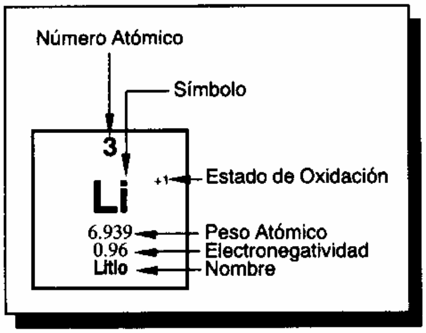
PERRY

MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO

SEXTA EDICIÓN

TOMO VI

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS



Periodo	Grupo IA 1	IIA 2	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIB 7	VIII 8	VIII 9	VIII 10	IB 11
1	1 H ±1 1.00797 2.20 Hidrógeno										
2	3 Li +1 6.939 0.96 Litio	4 Be +2 9.0122 1.50 Berilio									
3	11 Na +1 22.9898 0.96 Sodio	12 Mg +2 24.305 1.29 Magnesio									
4	19 K +1 39.102 0.84 Potasio	20 Ca +2 40.08 1.02 Calcio	21 Sc +3 44.956 1.28 Escandio	22 Ti +2 +3 +4 47.90 1.44 Titanio	23 V +2 +3 +4 +5 50.942 1.54 Vanadio	24 Cr +2 +3 +6 51.996 1.62 Cromo	25 Mn +2 +3 +4 +6 +7 54.938 1.57 Manganeso	26 Fe +2 +3 55.847 1.74 Hierro	27 Co +2 +3 58.9332 1.79 Cobalto	28 Ni +2 +3 58.71 1.83 Níquel	29 Cu 63.546 1.67 Cobre
5	37 Rb +1 85.47 0.85 Rubidio	38 Sr +2 87.62 0.97 Estroncio	39 Y +3 88.905 1.16 Ítrio	40 Zr +4 91.22 1.27 Circonio	41 Nb +3 +5 92.906 1.23 Niobio	42 Mo +2 +3 +4 +5 +6 95.94 1.73 Molibdeno	43 Tc +7 (97) 1.36 Tecnecio	44 Ru +2 +3 +4 +6 +8 101.07 1.42 Rutenio	45 Rh +3 102.905 1.87 Rodio	46 Pd +2 +4 106.4 1.78 Paladio	47 Ag 107.868 1.57 Plata
6	55 Cs +1 132.905 0.82 Cesio	56 Ba +2 137.34 0.82 Bario	57-71 ✲ Serie del Lantano	72 Hf +4 178.49 1.23 Hafnio	73 Ta +5 180.948 1.33 Tántalo	74 W +2 +3 +4 +5 +6 183.85 1.88 Volframio	75 Re +3 +4 +6 186.2 1.46 Renio	76 Os +2 +3 +4 190.2 1.52 Osmio	77 Ir +3 +4 +6 192.2 1.88 Iridio	78 Pt +2 +4 195.09 1.86 Platino	79 Au 196.967 1.98 Oro
7	87 Fr +1 (223) 0.86 Francio	88 Ra +2 (226) 0.97 Radio	89-103 ✱ Serie del Actinio	104 Unq⁻ (261) Unnilquadio	105 Unp⁻ (262) Unnilpentio	106 Unh⁻ (263) Unnilhexio	107 Uns⁻ (262) Unnilseptio				

	Periodo								
✲ Lantánidos	6	57 La +3 138.91 1.09 Lantano	58 Ce +3 +4 140.12 1.09 Cerio	59 Pr +3 +4 140.907 1.1 Praseodimio	60 Nd +3 144.24 1.1 Neodimio	61 Pm +3 (147) 1.07 Promecio	62 Sm +2 +3 150.35 1.12 Samario	63 Eu +2 +3 151.96 1.01 Europio	64 Gd 157.25 1.15 Gadolin
✱ Actínidos	7	89 Ac +3 227.0278 1.00 Actinio	90 Th +4 232.0381 1.11 Torio	91 Pa +4 +5 231.0359 1.14 Protactinio	92 U +3 +4 +5 +6 238.03 1.30 Uranio	93 Np +3 +4 +5 +6 238.029 1.29 Neptunio	94 Pu +3 +4 +5 +6 (244) 1.25 Plutonio	95 Am +3 +4 +5 +6 (243) 1.20 Americio	96 Cm (247) 1.20 Curio

Los valores del peso atómico entre paréntesis corresponden al valor

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela de Química
R5089

	VIII 8	VIII 9	VIII 10	IB 11	IIB 12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18	
											2 He 0 4.0026 0.00 Helio	1
						5 B ±3 10.811 2.02 Boro	6 C ±4 12.01115 2.36 Carbono	7 N +1 +2 ±3 +4 +5 14.0067 2.81 Nitrógeno	8 O −2 15.9994 3.37 Oxígeno	9 F −1 18.9984 4.00 Flúor	10 Ne 0 20.179 0.00 Neón	2
						13 Al +3 26.9815 1.63 Aluminio	14 Si +4 +2 −4 28.086 1.94 Silicio	15 P ±3 +5 30.9738 2.04 Fósforo	16 S ±2 +4 +6 32.064 2.46 Azufre	17 Cl ±1 +3 +5 +7 35.453 3.00 Cloro	18 Ar 0 39.948 0.00 Argón	3
	26 Fe +2 +3 55.847 1.74 Hierro	27 Co +2 +3 58.9332 1.79 Cobalto	28 Ni +2 +3 58.71 1.83 Níquel	29 Cu +1 +2 63.546 1.67 Cobre	30 Zn +2 65.38 1.60 Zinc	31 Ga +3 69.72 1.83 Galio	32 Ge +2 ±4 72.59 1.93 Germanio	33 As ±3 +5 74.9216 2.12 Arsénico	34 Se −2 +4 +6 78.96 2.45 Selenio	35 Br ±1 +3 +5 +7 79.904 2.82 Bromo	36 Kr 0 83.80 0.00 Kriptón	4
	44 Ru +2 +3 +4 +6 +8 101.07 1.42 tutenio	45 Rh +3 102.905 1.87 Rodio	46 Pd +2 +4 106.4 1.78 Paladio	47 Ag +1 107.868 1.57 Plata	48 Cd +2 112.40 1.62 Cadmio	49 In +3 114.82 1.69 Indio	40 Sn +2 +4 118.69 Es1.84taño	51 Sb ±3 +5 121.75 1.83 Antimonio	52 Te −2 +4 +6 127.60 2.03 Telurio	53 I ±1 +3 +5 +7 126.904 2.48 Yodo	54 Xe 0 131.30 0.00 Xenón	5
	76 Os +2 +3 +4 190.2 1.52 Osmio	77 Ir +3 +4 +6 192.2 1.88 Iridio	78 Pt +2 +4 195.09 1.86 Platino	79 Au +1 +3 196.967 1.98 Oro	80 Hg +1 +2 200.59 1.72 Mercurio	81 Tl +1 +3 204.37 1.74 Talio	82 Pb +2 +4 207.19 1.87 Plomo	83 Bi +3 +5 208.980 1.76 Bismuto	84 Po ±2 +4 (209) 1.76 Polonio	85 At ±1 +5 +7 (210) 1.96 Astatinio	86 Rn 0 (222) 0.00 Radón	6

61 Pm +3 (147) 1.07 Promecio	62 Sm +2 +3 150.35 1.12 Samario	63 Eu +2 +3 151.96 1.01 Europio	64 Gd +3 157.25 1.15 Gadolino	65 Tb +3 +4 158.924 1.1 Terbio	66 Dy +3 162.50 1.16 Disprosio	67 Ho +3 164.930 1.16 Holmio	68 Er +2 +3 167.26 1.27 Erbio	69 Tm +2 +3 168.934 1.16 Tulio	70 Yb +2 +3 173.04 1.06 Yterbio	71 Lu +3 174.97 1.2 Lutecio	6
93 Np +3 +4 +5 +6 238.029 1.29 Neptunio	94 Pu +3 +4 +5 +6 (244) 1.25 Plutonio	95 Am +3 +4 +5 +6 (243) 1.20 Americio	96 Cm +3 +4 +5 +6 (247) 1.20 Curio	97 Bk +3 +4 (247) 1.20 Berkelio	98 Cf +3 (251) 1.20 Californio	99 Es +3 (254) 1.20 Eistenio	100 Fm +3 (257) 1.20 Fermio	101 Md +3 (258) 1.20 Mendelevio	102 No +2 +3 (259) 1.20 Nobelio	103 Lr +3 (260) – Lawrencio	7

atómico entre paréntesis corresponden al valor del isótopo más estable.

RECIBIDO
15 OCT

Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Escuela de Química

Universidad de Carabobo
Biblioteca
Facultad de Ingeniería
010610

COMPRA

U.C.
Y
CLASIFICADO

INGBC

Fecha 10 OCT 2001

PERRY MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO

Sexta edición
(Tercera edición en español)

Tomo VI

Preparado por un equipo de especialistas bajo la dirección editorial de

Robert H. Perry
Editor (fallecido)

Don W. Green
Editor
Conger-Gabel Professor of Chemical and Petroleum Engineering
University of Kansas

James O. Maloney
Editor Asistente
Professor of Chemical Engineering
University of Kansas

McGRAW-HILL

MÉXICO • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MADRID • NUEVA YORK
PANAMÁ • SAN JUAN • SANTAFÉ DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • HAMBURGO • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI • PARÍS
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • ST. LOUIS • SIDNEY • TOKIO • TORONTO

Contenido

Si desea el contenido más detallado, véase la página del inicio de cada sección. También puede remitirse al índice alfabético al final de este Manual del Ingeniero Químico.

Sección

Tomo I
Factores de conversión y tablas diversas *Don W. Green* 1

Matemáticas *Arthur E. Hoerl* 2

Datos físicos y químicos *Peter E. Liley, Robert C. Reid, Evan Buck* 3

Tomo II
Cinética de las reacciones, diseño de reactores y termodinámica *Kuang-Hui Lin, Hendrick C. Van Ness, Michael M. Abbott* 4

Mecánica de fluidos y de partículas *Byron C. Sakiadis* 5

Transporte y almacenamiento de fluidos *Raymond P. Genereaux* 6

Manejo de sólidos a granel y embalaje de sólidos y líquidos *Grantges J. Raymus* 7

Reducción y aumento de tamaño *Richard H. Snow* 8

Tomo III
Utilización, conversión y conservación de los recursos energéticos *Richard C. Corey, Ezekail L. Clark* 9

Transmisión de calor *James G. Knudsen* 10

Equipos de transferencia de calor *Frank L. Rubin* 11

Psicrometría, enfriamiento por evaporación, refrigeración y proceso criogénicos *Eno Bagnoli, Robert W. Norris, Thomas M. Flynn, Klaus D. Timmerhaus* 12

Tomo IV
Destilación *J. D. Seader* 13

Transferencia de masa y absorción de gas *William M. Edwards* 14

Extracción de líquido-líquido *Lanny A. Robbins* 15

Adsorción e intercambio iónico *Theodore Vermeulen, M. Douglas LeVan* 16

Procesos modernos de separación *Joseph D. Henry, Jr.* 17

Tomo V
Sistemas líquido-gas *J. R. Fair* 18

Sistemas líquido-sólido *Shelby A. Miller* 19

Desecación de sólidos y sistemas gas-sólido *Harold F. Porter* 20

Sistemas sólido-sólido y líquido-líquido *William H. Goldberger, Lanny A. Robbins* 21

Tomo VI
Control de procesos *T. C. Wherry, Jerry R. Peebles* 22

Materiales de construcción *Albert S. Krisher, Oliver W. Siebert* 23

Motores eléctricos y auxiliares *Frank L. Evans, Jr.* 24

Factores económicos de los procesos *F. A. Holland* 25

Manejo de los desperdicios *Anthony J. Buonicore, Louis Theodore* 26

Ingeniería bioquímica *Henry R. Bungay* 27

Índice

Lista de colaboradores

Michael M. Abbott, Ph.D., Department of Chemical and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute (Sección 4, Termodinámica)

Charles M. Ambler, B.S.Ch.E. (fallecido), Consultant; Director of Chemical Engineering, Sharples Division, Pennwalt Corporation (Sección 19, Centrífugas)

Robert C. Amero, B.S. (jubilado), Staff Engineer, Gulf Science and Technology Company (Sección 9, Combustibles líquidos, Combustión)

Eno Bagnoli, M.S., Senior Research Associate, E. I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 12, Psicrometría)

Richard Barrett, M.S., Projects Manager, Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories (Sección 9, Sistemas de vapor)

Kenneth J. Bell, Ph.D., Regents Professor of Chemical Engineering Oklahoma State University (Sección 10, Diseño térmico de intercambiadores de calor, Condensadores, Recalentadores)

Richard C. Bennett, B.S.Ch.E., Division Manager, Swenson Division, Whiting Corp. (Sección 19, Cristalización a partir de solución)

Evan Buck, M.S.Ch.E., Manager-Process Design Data and Thermodynamics, Central Engineering Department, Union Carbide Corporation (Sección 3, Predicción y Correlación de propiedades físicas)

Henry R. Bungay, Ph.D., Professor of Chemical and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute (Sección 27, Ingeniería bioquímica)

Anthony J. Buonicore, M.Ch.E., Diplomate, AAEE, President Buonicore-Cashman Associates, Inc. (Sección 26, Manejo de la contaminación del aire)

C. Edward Capes, Ph.D., Senior Research Officer and Head, Chemical Engineering Section, National Research Council, Ottawa, Canada (Sección 8, Aumento de tamaño)

Harold F. Chambers, Jr., Ph.D., Supervisory Mechanical Engineer, Pittsburgh Energy Technology Center, U.S. Department of Energy (Sección 9, Licuefacción del carbón)

Ezekail L. Clark, B.S., Consultant (Sección 9, Gasificación del carbón)

Neil H. Coates, B.S., Department Head, Energy Systems Engineering Department, The MITRE Corporation, Metrek Division (Sección 9, Combustión en lechos fluidificados)

William Corder, M.S., Assistant Vice President, Consolidation Coal Company (Sección 17, Sublimación)

Richard C. Corey, B.S., Department Staff (jubilado) Energy Systems Engineering Department, The MITRE Corporation, Metrek Division (Sección 9, Combustibles sólidos y gaseosos, Combustión, Costos de combustible y energía, Conversión del carbón, Equipos de combustión o cal para procesos, Transporte y regeneración de calor)

B. B. Crocker, S.M., Distinguished Fellow -Engineering, Corporate Engineering Department, Monsanto Company (Sección 18, Separación de fases)

Bruce F. Curran, S.B., Project Manager, Design Division, E. I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 6, Recipientes de almacenamiento y proceso)

Donald A. Dahlstrom, Ph.D., Senior Vice President, Research and Development, Eimco Process Equipment Company (Sección 19, Operaciones de sedimentación por gravedad)

J. D. Darji, M.S.Ch.E., Senior Technical Consultant, Infilco Degremont Inc. (Sección 19, Equipos de intercambio de iones y adsorción)

William M. Edwards, Ph.D., Senior Staff Research Engineer, Shell Development Company (Sección 14, Transferencia de masa y absorción de gases)

Robert C. Emmett, Jr., B.S.Ch.E., Senior Process Consultant, Technology and Development, Eimco Process Equipment Company (Sección 19, Operaciones de sedimentación por gravedad)

Frank L. Evans, Jr., B.S.M.E., L.L.B. (fallecido), Editor, *Hydrocarbon Processing*, Gulf Publishing Co. (Sección 24, Unidades motrices para maquinaria de proceso)

J. R. Fair, Ph.D., Professor of Chemical Engineering University of Texas (Sección 18, Contacto gas-líquido)

R. A. Fiedler, B.S.,Ch.E., Manager of Applications-Sedimentation Technology, Dorr-Oliver Inc. (Sección 21, Clasificaciones en húmedo)

Thomas M. Flynn, Ph.S., Consultant, Cryogenic Engineering (Sección 12, Procesos criogénicos)

Willard E. Fraize, Sc.D., Senior Energy Systems Engineer, Energy and Resources Division, The MITRE Corporation, Metrek Division (Sección 9, Cogeneración)

Yuan C. Fu, Ph.D., Proyect Manager, Pittsburgh Energy Technology Center, U.S. Department of Energy (Sección 9, Licuefacción del carbón)

Raymond P. Genereaux, Ch.E. (jubilado), Chemical Engineer, E. I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 6, Transporte y almacenamiento de fluidos)

W. M. Goldberger, D.Ch.E., Director of Research and Development, Superior Graphite Company (Sección 21, Sistemas sólido-sólido)

H.A. Grabowski, B.S., Senior Engineering Consultant, C-E Environmental Systems, Combustion Engineering Inc. (Sección 9, Generadores de vapor)

Joseph B. Gray, Ph.D. (jubilado), Senior Consultant Engineering Department, E. I. du Pont de Nemours and Co. (Sección 19, Agitación de suspensiones de partículas de baja viscosidad)

Don W. Green, Ph.D., Conger-Gabel Distinguished Professor of Chemical and Petroleum Engineering, University of Kansas (Sección 1, Factores de conversión y tablas diversas)

C. Fred Gurnham, D. Eng. Sc., Consultant (Sección 19, Exprimido)

C. Addison Hempstead, B.M.E. (jubilado), Senior Design Consultant, E.I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 6, Tubería de plantas de proceso)

Joseph D. Henry, Jr., Ph.D., Professor and Chairman of Chemical Engineering, West Virginia University (Sección 17, Cristalización a partir de la fusión, Procesos de separación basados principalmente en la acción en un campo, Procesos modernos)

Nevin K. Hiester, Ph.D., Associate Director, Business Intelligence Program, SRI International (Sección 16, Adsorción e intercambio iónico)

W. S. Winston Ho, Ph.D., Engineering Associate, Exxon Research and Engineering Company (Sección 17, Procesos por medio de membranas)

Arthur E. Hoerl, M.A., Professor Department of Mathematical Sciences, University of Delaware (Sección 2, Matemáticas y estadísticas)

Richard L. Hoglund, M.S., Chemical Engineer, Union Carbide Corporation-Nuclear Division (Sección 17, Procesos de separación por difusión)

F.A. Holland, D.Sc., Ph.D., Chairman, Department of Chemical Engineering, University of Salford, Salford, England; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers (Sección 25, Factores económicos de los procesos)

Arthur D. Holt, Formerly Consultant, Processing Equipment Division, The Jeffrey Manufacturing Co. (Sección 10, Diseño térmico para el procesamiento de sólidos; (Sección 11, Intercambiadores de calor para sólidos)

Hoyt C. Hottel, S.M., Professor Emeritus of Chemical Engineering, Massachussets Institute of Technology (Sección 10, Radiación)

Arthur E. Humprey, Ph. D., Provost, Lehigh University (Sección 27, Ingeniería bioquímica)

Louis J. Jacobs, Jr., M.S.Ch.E., Director of Corporate Engineering Division, A. E. Staley Manufacturing Company (Sección 19, Filtración)

Eric Jenett, M.S.Ch.E., Manager Process Engineering, Brown & Root, Inc. (Sección 24, Recuperación de potencia de corrientes de líquidos)

T.L.B. Jepsen, M.S., Min.Proc., Mettallurgical Process Engineer, Basic, Inc. (Sección 21, Separación de medios densos)

Brian H. Kaye, Ph.D., Professor of Physics and Director of Institute for Fine Particles Research, Laurentian University (Sección 8, Análisis del tamaño de las partículas)

Gerhard Klein, M.S., Research Engineer, Water Technology Center, University of California, Berkeley (Sección 16, Adsorción e intercambio iónico)

Ronald P. Klepper, B.S.Ch.E., Manager, Process Technology, Eimco Process Equipment Company (Sección 19, Operaciones de sedimentación por gravedad)

Frank S. Knoll, M.S., Min.Proc., President, Carpco, Inc. (Sección 21, Separación electrostática)

James G. Knudsen, Ph.D., Professor of Chemical Engineering, Oregon State University (Sección 10, Conducción y convección)

Albert S. Krisher, B.S.Ch.E., Senior Fellow, Monsanto Company (Sección 23, Materiales de construcción)

Zdzislaw M. Kurtyka, D.Sc. (fallecido) Formerly, Department of Chemicál Engineering. The University of the West Indies, St. Augustine, Trinidad (Sección 13, Azeotropía)

Robert Lemlich, Ph.D., Professor of Chemical Engineering, University of Cincinnati (Sección 17, Métodos de separación mediante burbujas de adsorción)

M. Douglas Le Van, Ph.D., Associate Professor of Chemical Engineering, University of Virginia (Sección 16, Adsorción e intercambio iónico)

Norman N. Li, Sc.D., Director, Separations Research, UOP, Inc. (Sección 17, Procesos por medio de membranas)

Peter E. Liley, Ph.D., D.I.C., Professor, School of Mechanical Engineering and Center for Information and Numerical Data Analysis and Syntesis, Purdue University (Sección 3, Datos físicos y químicos)

Kuan-Hui Lin, Ph.D., Research Staff Chemical Technology

John J. McKetta, Ph.D., Joe C. Walter Chair, Chemical Engineering, University of Texas (Sección 2, Análisis dimensional)

Ross E. McKinney, Sc.D., N.T. Veatch Professor of Environmental Engineering, University of Kansas (Sección 26, Manejo del agua de desperdicio industrial)

Patrick M. McNeese, B.S., General Manager of Purchasing, Cities Service Oil and Gas Company (Sección 22, Control de procesos)

James O. Maloney, Ph.D., Professor of Chemical Engineering, University of Kansas (Sección 21, Sistemas líquido-líquido)

Eugene Mezey, Ph.D., Senior Chemist, Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories (Sección 9, Calentamiento eléctrico)

A. W. Michalson, B. S. Min.E., President, A. W. Michalson Company (Sección 19, Equipos de intercambio de iones y adsorción)

Shelby A. Miller, Ph. D., Senior Chemical Engineer, Argonne National Laboratory (Sección 19, Lixiviación)

Charles J.B. Mitchell, B.S. (jubilado), Principal Consultant, Engineering Service Division, E. I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 6, Bombeo de líquidos y gases)

D. W. Mitchell, Ph.D., Technical Director, Carpco, Inc. (Sección 21, Separación electrostática)

Herbert A. Moak, B.S., Project Engineer, E.I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 11, Aislamiento térmico)

Charles G. Moyers, Jr., Ph.D., Principal Engineer, Union Carbide Corporation-Engineering and Technical Services Division (Sección 17, Cristalización a partir de la fusión)

M. Zuhair Nashed, Ph.D., Professor of Mathematics and Professor of Electrical Engineering, University of Delaware (Sección 2, Generalidades sobre matemáticas)

John Newman, Ph.D., Professor of Chemical Engineering, University of California, Berkeley (Sección 17, Separaciones basadas principalmente en la acción en un campo, Teoría de las raciones)

Robert W. Norris, B.S., President Robert W. Norris and Associates, Inc. (Sección 12, Enfriamiento por evaporación, refrigeración)

James Y. Oldshue, Ph.D., Vice President, Mixing Technology, Mixing Equipment Company, Inc. (Sección 19, Agitación de suspensiones de partículas de baja viscosidad)

Carl R. Olson, M.S.E.E., Staff Planning Manager, Industrial Projects Marketing, Westinghouse Electric Corp. (Sección 24, Motores eléctricos y controles de motores)

Bhupendra K. Parekh, Ph.D., Research Specialist, Exxon Minerals Company (Sección 21, Separación de sólidos ultrafinos)

Jerry R. Peebles, M.S., Engineering Associate, Cities Service Oil and Gas Company (Sección 22, Procesos de control)

W.R. Penney, Ph.D., Director of Corporate Process Engineering, A. E. Staley Manufacturing Company (Sección 18, Dispersión de gas en líquido)

Herbert A. Pohl, Ph.D., Professor of Physics, Oklahoma State University (Sección 17, Procesos de separación basados principalmente en la sección en un campo, Electroforesis)

Kent Pollock, Ph.D., Professor of Physics, Oklahoma State University (Sección 17, Procesos de separación, basados principalmente en la acción en un campo, Electroforesis)

Harold F. Porter, B.S. (jubilado), Principal Division Consultant, E.I. du Pont de Nemours and Co. (Sección 20, Desecación de sólidos y sistemas gas-sólido)

Michael E. Prudich, Ph.D., Research Engineer, Gulf Research and Development Company (Sección 17, Procesos modernos de separación sólido-líquido)

Grantges J. Raymus, M.E., M.S., President, Raymus Associates Incorporated, Packaging Consultants; Adjunct Professor and Assistant Director, Center for Packaging Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey (Sección 7, Manejo de sólidos a granel y embalaje de sólidos y líquidos)

Robert C. Reid, Sc. D., Professor, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (Sección 3, Predicción y correlación de propiedades físicas)

Lanny A. Robbins, Ph.D., Research Scientist, Dow Chemical Company (Sección 15, Extracción de líquidos; Sección 21, editor de la parte: Sistemas líquido-líquido)

Frank L, Rubin, B.A., B.Ch.E., Engineering Consultant, Practical Heat Transfer Consultants (Sección 11, Intercambiadores de calor de casco y tubo)

Byron C. Sakiadis, Ph.D., Senior Research Fellow, Engineering Technology Laboratory, E. I. du Pont de Nemours & Co. (Sección 5, Mecánica de fluidos y de partículas)

Adel F. Sarofim, Sc. D., Professor of Chemical Engineering and Assistant Director, Fuels Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (Sección 10, Radiación)

George A. Schurr, Ph. D., Consultant E.I. du Pont de Nemours and Co. (Sección 20, Desecación de sólidos)

J. D. Seader; Ph.D., Professor of Chemical Engineering, University of Utah (Sección 13, Destilación)

Konrad T. Semrau, M.S.; Senior Chemical Engineer, SRI International (Sección 20, Separaciones gas-sólido)

Oliver W. Siebert, B.S.M.E., Senior Fellow, Monsanto Company; Adjunct Professor of Mechanical Engineering, Washington University (Sección 23, Materiales de construcción)

J. H. Silberberg, Ph.D., Assistant Director, Texas Petroleum Research Committee, University of Texas (Sección 2, Análisis dimensional)

Charles E. Silverblatt, M.S.Ch.E., Vice President, Technology and Development, Eimco Process Equipment Company (Sección 19, Operaciones de sedimentación por gravedad)

Julian C. Smith, B.Chem., Ch.E., Professor of Chemical Engineering, Cornell University (Sección 19, Selección de un separador sólido-líquido)

Richard H. Snow, Ph.D., Director, National Institute for Petroleum and Energy Research (Sección 8, Reducción y aumento de tamaño)

Thomas C. Sorenson, M.B.A., Min.Eng., President, Galigher Ash Ltd. (Canada) (Sección 21, Flotación)

K.S.Spiegler, Ph.D., Professor of Mechanical Engineering Emeritus, University of California, Berkeley (Sección 17, Procesos de separación basados principalmente en la acción en un campo, Electroforesis)

Guggilam C. Sresty, M.S., Senior Engineer, IIT Research Institute(Sección 8, Equipo de trituración y molienda)

F.C. Standiford, M.S., President E. L. Badger Associates, Inc. (Sección 10, Diseño térmico de evaporadores; (Sección 11, Evaporadores)

Paul L. Stavenger, M.S.Ch.E., Director of Technology, Dorr-Oliver Inc. (Sección 21, Clasificaciones en húmedo)

H. Steen-Johnson, M.S.M.E. (jubilado), Chief Staff Engineer, Elliot Co. (Sección 24, Turbinas de vapor)

D. E. Steinmeyer, M.A., M.S., Manager Engineering, Corporate Engineering Department, Monsanto Company (Sección 18, Dispersiones de líquido en gas)

David Stuhlbarg, Ch.E., Heat-Transfer Consultant (Sección 10, Diseño térmico de evaporadores; Sección 11, Serpentines de tanques)

David E. Stutz, B.S., Research Scientist, Batelle Memorial Institute, Columbus Laboratories (Sección 9, Calentamiento eléctrico)

George Tchobanoglous, Ph.D., Professor of Environmental Engineering, University of California at Davis (Sección 26, Manejo de los desperdicios sólidos industriales)

Philip O. Teter, Jr., B.S., Electrical Engineer, Corps of Engineers (Sección 22, Control de procesos)

Rich L. Thelen, B.S., M.E., Vice President, EIE Company, Inc. (Sección 21, Muestreo de sólidos)

Louis Theodore, Sc.D., Professor of Chemical Engineering, Manhattan College (Sección 26, Manejo de los desperdicios)

Klaus D. Timmerhaus, Ph.D., Associate Dean of Engineering, Director of Engineering Research Center, University of Colorado (Sección 12, Procesos criogénicos)

David B. Todd, Ph.D., Technical Director, Plastics Equipment Division, Baker Perkins Inc. (Sección 19, Mezcla de pastas y materiales viscosos)

Robert E. Treybal, Ph.D. (fallecido), Professor and Chairman, Department of Chemical Engineering, University of Rhode Island (Sección 21, Sistema líquido-líquido)

George T. Tsao, Ph.D., Director, Laboratory of Renewable Resource Engineering, Purdue University (Sección 27, Ingeniería bioquímica)

Vincent W. Uhl, Ph. D., Professor of Chemical Engineering, University of Virginia (Sección 10, Recipientes agitados)

Hendrick C. Van Ness, D. Eng., Department of Chemical and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute (Sección 4, Termodinámica)

Theodore Vermeulen, Ph.D. (fallecido), Professor of Chemical Engineering, Faculty Scientist, Lawrence Berkeley Laboratory, and Director of the Water Technology Center, University of California, Berkeley (Sección 16, Adsorción e intercambio iónico)

Edward Von Halle, Ph.D., Chemical Engineer, Union Carbide Corporation-Nuclear Division (Sección 17, Procesos de separación por difusión)

F.A. Watson, M.Sc., Senior Lecturer, Department of Chemical Engineering, University of Salford, Salford, England; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers, (Sección 25, Factores económicos de los procesos)

Ionel Wechsler, M.S.Min. and Met., Vice President, Sala Magnetics, Inc. (Sección 21, Separación magnética)

David F. Wells, B.S., President, David F. Wells and Associates (Sección 20, Sistema de lechos fluidificados)

T.C. Wherry, B.S.E.E., B.S.Ch.E. (jubilado), Vice President, Director of Systems Research, Applied Automation, Inc.; Member Board of Directors (Sección 22, Control de procesos)

J. K. Wilkinson, M.Sc., Senior Lecturer, Department of Chemical Engineering, University of Salford, Salford, England; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers (Sección 25, Factores económicos de los procesos)

Richard E. Worsham, B.S., Region Engineer, Cities Service Oil and Gas Company (Sección 22, Control de procesos)

Roy M. Young, B.S.Ch.E., Process Automation Consultant, R & M Associates, Inc. (Sección 22, Control de procesos)

Prefacio de la sexta edición

En el decenio pasado, la ingeniería química contribuyó, en diversas e importantes maneras, al progreso industrial de todo el mundo. En los métodos de diseño de equipos y procesos se lograron avances considerables. Este progreso se debe, en parte, a factores como el uso cada vez mayor de las computadoras y la disponibilidad de mejores materiales de construcción. El enfoque sobre el aumento de valor de la energía y la necesidad de una mejor administración de los desperdicios fueron factores que también afectaron las decisiones de diseño. Sin embargo, la buena práctica de la ingeniería química aún se basa fundamentalmente en dos aspectos: el empírico y el teórico. Desde la publicación de la quinta edición se realizaron contribuciones importantes en los dos aspectos anteriores. Por este motivo, cada una de las 25 secciones de la quinta edición se revisaron y actualizaron y, en algunas áreas (como por ejemplo, economía, destilación, extracción y absorción), las secciones se volvieron a escribir en su totalidad. Por otra parte, se agregaron dos secciones nuevas para incorporar las tecnologías que surgieron en dicho decenio, es decir, la bioingeniería y la administración de desperdicios.

En el *Manual del Ingeniero Químico* se modificó el método de manejo de unidades. La mayoría de los ingenieros están conscientes que en gran parte del mundo se utilizan las unidades SI; sin embargo, en Estados Unidos todavía se usan las unidades U.S. (pero existe una tendencia definitiva en este país hacia una mayor aplicación de las unidades SI). Con objeto de complacer a los diferentes usuarios, este *Manual del Ingeniero Químico* se ha escrito, hasta donde ha sido posible, en ambos sistemas. Las tablas y figuras que se revisaron de ediciones anteriores, no se volvieron a redactar o dibujar, porque hacerlo no sería práctico. Por lo general, las tablas y figuras nuevas se presentan en unidades SI y, en algunos casos, en ambos sistemas de unidades. Sin embargo, en todos los casos, junto con las figuras y tablas se proporcionan los factores de conversión necesarios. Los números que aparecen en el texto se dan tanto en unidades SI como U.S. y las constantes dimensionales que aparecen en varias ecuaciones empíricas también se especifican en ambos sistemas de unidades. En general, los editores consideran que el *Manual del Ingeniero Químico* lo pueden utilizar las personas que trabajan con cualquiera de los dos sistemas de unidades.

Numerosas personas colaboraron en la preparación de esta edición. Los editores agradecen en particular la asistencia de Wanda S. Dekat, Georgea L. de Medina y Guy L. Green, quienes realizaron la tediosa tarea de preparar el índice. La asistencia secretarial de mecanografía estuvo a cargo de Jill A. Schoeling y Ruth R. Sleeper.

Los editores agradecen especialmente las contribuciones de Raymond Genereaux, editor de la sección 6, "Transporte y almacenamiento de fluidos", quien ha sido la única persona que ha participado en la preparación de las seis ediciones del *Manual del Ingeniero Químico.* Se aprecian sus esfuerzos y compromisos en todos estos años de colaboración con el *Manual del Ingeniero Químico.*

La muerte repentina de Bob Perry, durante la preparación de esta edición, fue una pérdida irreparable. Él estaba profundamente comprometido con la continuación del *Manual del Ingeniero Químico* y la calidad representada por la tradición de este libro. Se le extraña.

De igual manera lamentamos la pérdida de Frank L. Evans Jr. y Theodore Vermeulen, editores de las secciones 24 y 16, respectivamente, quienes realizaron contribuciones invaluables al *Manual del Ingeniero Químico.*

DON W. GREEN

Sección 22

Control de procesos *

T. C. Wherry, B.S.E.E., B.S.Ch.E., *Vice President (Retirado), Director of Systems Research, Applied Automation, Inc.; Member, Board of Directors; Member, American Institute of Chemical Engineers, American Automatic Control Council; Fellow, Instrument Society of America; Fellow, American Institute of Chemists; Registered Professional Engineer (Oklahoma), (Editor de la sección)*

Jerry R. Peebles, M.S., P.E., *Engineering Associate, Cities Service Oil and Gas Company. (Editor asistente de la sección)*

Patrick M. McNeese, B.S., *General Manager of Purchasing, Cities Service Oil and Gas Company*

Philip O. Teter, Jr., B.S., P.E., *Electrical Engineer, Corps of Engineers*

Richard E. Worsham, B.S., *Region Engineer, Cities Service Oil and Gas Company*

Roy M. Young, B.S., Ch.E., *Process Automation Consultant, R & M Associates, Inc.*

FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO

Sistema general de control 22-4
Sistema de circuitos abierto y cerrado 22-4
Control de retroalimentación 22-4
Control de alimentación directa 22-4
Diagramas de bloques 22-6
Funciones de transferencia utilizando las transformadas de Laplace 22-6
Definiciones y restricciones 22-6
Funciones de transferencia 22-7
Combinación de funciones de transferencia 22-7
Características del proceso 22-8
Elemento proporcional 22-7
Elemento de capacitancia 22-9
Elemento de retraso de primer orden (elemento de la constante de tiempo) 22-9
Elemento de retraso de segundo orden (elemento cuadrático u oscilatorio) 22-10
Retraso distancia-velocidad (elemento de tiempo muerto) 22-12
Retrasos de más alto orden 22-12
Características del sistema de control de retroalimentación 22-13
Cierre del circuito 22-14
Control de encendido-apagado (*on-off*) 22-14
Control proporcional 22-15
Control proporcional más reajuste (Control PI) 22-18
Control proporcional más reajuste más rapidez de cambio (PID) 22-20

* Agradecemos a las siguientes personas sus aportaciones a la quinta edición: E. C. Miller, B. O. Ayers, E. N. Fuller, D. A. Jewett, D. W. Lane, R. D. McCoy, R. S. Moser, F. T., Ogle, T. J. Pemberton, W. G. Ragains, R. C. Richardson, O. E. Ririe, R. A. Sanford, H. W. Staten, W. S. Stewart, y E. D. Tolin.

Sistemas de más alto orden . . . 22-21
Ajustes del controlador . . . 22-21
Criterios de rendimiento del controlador . . . 22-22
Métodos de ajuste basados en modelos de procesos conocidos . . . 22-23
Procedimientos de ajuste cuando se desconoce el modelo del proceso . . . 22-27
Temas adicionales sobre el control . . . 22-29
Grados de libertad y control . . . 22-29
Control en cascada . . . 22-31
Control de alimentación directa . . . 22-32
Sistemas combinados de alimentación directa e inversa . . . 22-33
Compensación del tiempo muerto . . . 22-33
Control de encendido-apagado, sin atenuación (*on-off*) . . . 22-34
Sistemas de control no lineales . . . 22-34

MEDICIONES DEL PROCESO

Mediciones de temperatura . . . 22-35
Escala internacional de temperatura . . . 22-35
Termopares . . . 22-35
Termómetros de resistencia . . . 22-36
Termómetros de sistema lleno . . . 22-37
Termómetros bimetálicos . . . 22-38
Termómetros de líquido en capilares de vidrio . . . 22-38
Pirómetros . . . 22-38
Mediciones de presión . . . 22-39
Estándares (patrones) y calibración . . . 22-39
Métodos de columnas de líquido . . . 22-40
Métodos de elemento elástico . . . 22-40
Métodos eléctricos . . . 22-42
Mediciones de flujo . . . 22-43
Medidores de flujo por el derramamiento en remolino . . . 22-43
Medidores de flujo ultrasónicos . . . 22-43
Medición de nivel . . . 22-44
Dispositivos visuales . . . 22-44
Dispositivos activados por flotador . . . 22-44
Dispositivos de desplazador . . . 22-45
Dispositivos de carga . . . 22-46
Métodos diversos . . . 22-48
Medición de propiedades físicas . . . 22-49
Densidad y densidad relativa (gravedad específica) . . . 22-49
Viscosidad y consistencia . . . 22-51
Analizadores del índice de refracción . . . 22-51
Conductividad térmica . . . 22-52
Analizadores de punto de ebullición . . . 22-52
Analizadores del punto de inflamación (*flash point*) . . . 22-52
Analizadores de la composición química del proceso . . . 22-52
Analizadores cromatográficos . . . 22-52
Analizadores del infrarrojo . . . 22-53
Analizadores del ultravioleta y de radiación visible . . . 22-53
Turbidimetría . . . 22-53
Paramagnetismo . . . 22-53
Nefelometría . . . 22-53
Instrumentos electroanalíticos . . . 22-53
Análisis conductimétrico . . . 22-53
Mediciones conductimétricas sin electrodos . . . 22-54
Análisis oscilométrico . . . 22-54
Análisis potenciométrico . . . 22-54
Mediciones de pH . . . 22-54
Electrodos de iones específicos . . . 22-54
Análisis coulombimétrico . . . 22-54
Análisis polarográfico . . . 22-54
Medición de la humedad . . . 22-54
Método del punto de condensación o rocío . . . 22-54
Método de eletrólisis . . . 22-55
Método de Karl Fischer . . . 22-55
Método del punto de condensación o rocío (transición de la fase salina) . . . 22-55
Métodos analíticos generales . . . 22-55
Método piezoeléctrico . . . 22-55
Método de capacitancia . . . 22-56
Método de calor de sorción . . . 22-56
Método psicrométrico . . . 22-56
Método de resistencia (conductancia) . . . 22-56
Sistemas de muestreo para analizadores de proceso . . . 22-56
Selección del punto de muestreo . . . 22-56
Toma de la muestra del proceso . . . 22-56
Transporte de la muestra . . . 22-57
Muestreo de varias corrientes . . . 22-58
Punto de retorno de la muestra . . . 22-58
Muestra de calibración . . . 22-58
Acondicionamiento de la muestra . . . 22-58
Ejemplo 1 . . . 22-59

INSTRUMENTOS INDICADORES Y DE REGISTRO

Requisitos de presentación de la información sobre la operación . . . 22-60
Exactitud . . . 22-60
Repetibilidad . . . 22-60
Facilidad de lectura . . . 22-60
Velocidad de respuesta . . . 22-61
Transductores de la medición al indicador . . . 22-61
Movimiento rotatorio o posición angular . . . 22-61
Posición lineal . . . 22-61
Fuerza o distorsión . . . 22-62
Balanza de movimiento . . . 22-65
Balance nulo o de cero . . . 22-65
Mediciones eléctricas . . . 22-65
Conversiones analógicas y digitales . . . 22-66
Instrumentos indicadores . . . 22-66
Analógicos . . . 22-66
Digitales . . . 22-68
Instrumentos de registro . . . 22-69
Analógicos . . . 22-69
Digitales . . . 22-70
Centro de control . . . 22-70
Requisitos de información . . . 22-70
Funciones del equipo . . . 22-71
Presentación del sistema . . . 22-71
Estaciones de control . . . 22-71
Nuevo centro de control: Algunas consideraciones de diseño . . . 22-72

CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

Controladores autooperados . . . 22-73
Controladores de encendido-apagado (*on-off*) . . . 22-73
Controladores proporcionales . . . 22-73
Controladores electrónicos . . . 22-73
Amplificador operacional . . . 22-73
Entradas y salidas del controlador electrónico . . . 22-74
Modo de control de dos posiciones (encendido-apagado, *on-off*) . . . 22-74
Modo de control proporcional (P) . . . 22-75
Controladores proporcional-integral (PI) . . . 22-75
Controladores proporcional-integral-derivada (PID) . . . 22-76
Controladores neumáticos . . . 22-77
Amplificadores y relevadores neumáticos . . . 22-78
Control de dos posiciones (encendido-apagado, *on-off*) . . . 22-78
Control proporcional (P) . . . 22-79
Control proporcional y de reajuste (PI) . . . 22-79
Control proporcional más rapidez de cambio (PD) . . . 22-79
Control proporcional más reajuste más rapidez de cambio (PID) . . . 22-80
Controlador tipo estantería . . . 22-81
Controladores de microprocesador . . . 22-82
Conceptos generales . . . 22-82
Algoritmos . . . 22-83
Ajuste adaptable . . . 22-83
Control más sensible y estricto . . . 22-84
Control sobreamortiguado . . . 22-84
Cambios de ganancia basados en fuentes externas . . . 22-84
Ganancia en procesos no lineales . . . 22-84
Aplicaciones adicionales . . . 22-84
Simplificación lógica de sistemas de control . . . 22-84
Álgebra booleana . . . 22-84
Control programable . . . 22-85

. 22-56
. 22-56
. 22-56
. 22-56
. 22-57
. 22-58
. 22-58
. 22-58
. 22-58
. 22-59

REGISTRO

. 22-60
. 22-60
. 22-60
. 22-60
. 22-61
. 22-61
. 22-61
. 22-61
. 22-62
. 22-65
. 22-65
. 22-65
. 22-66
. 22-66
. 22-66
. 22-68
. 22-69
. 22-69
. 22-70
. 22-70
. 22-70
. 22-71
. 22-71
. 22-71
. 22-72

COS

. 22-73
. 22-73
. 22-73
. 22-73
. 22-73
. 22-74
. 22-74
. 22-75
. 22-75
) 22-76
. 22-77
. 22-78
. 22-78
. 22-79
. 22-79
. 22-79
. 22-80
. 22-81
. 22-82
. 22-82
. 22-83
. 22-83
. 22-84
. 22-84
. 22-84
. 22-84
. 22-84
. 22-84
. 22-84
. 22-85

ELEMENTOS DE CONTROL FINAL

Válvulas de control 22-86
- Cuerpos de válvula 22-86
- Obturador de válvula 22-87
- Selección de la válvula 22-90

Accionadores de posición lineal 22-91
- Accionadores neumáticos 22-91
- Accionadores hidráulicos 22-94
- Accionadores eléctricos 22-94
- Accionadores mecánicos 22-94

Posicionadores y reforzadores (*Boosters*) 22-94
- Principios de operación 22-95
- Dinámica de los posicionadores y reforzadores 22-95
- Lineamientos de las aplicaciones 22-95

Válvulas para alimentación de sólidos 22-96

Otros elementos de control final 22-96
- Unidades motrices de velocidad variable 22-96
- Accionadores de energía eléctrica variable 22-96
- Bombas de salida variable 22-96

TELEMETRÍA Y TRANSMISIÓN

Transmisión de señales analógicas 22-97
- Transmisión de señales neumáticas 22-97
- Métodos electrónicos de transmisión analógica 22-98

Transmisión de señales digitales 22-100
- Telemetría digital y transmisión de datos 22-100
- Transmisión de datos de computadora a computadora 22-102

Organización del equipo para control de procesos 22-102
- Sistemas de control analógico 22-102
- Sistemas de control por computadora digital 22-103
- Sistemas de control distribuido por microprocesador 22-104

CONTROL DE PROCESOS POR COMPUTADORA

Jerarquía del control por computadora 22-105

Control de procesos 22-105
- Dominio del control de procesos 22-105
- Configuraciones computador-operador-proceso 22-106
- Jerarquía funcional de un sistema de control por computadora de una compañía 22-106

Control de las operaciones unitarias por computadora 22-107
- Reducción de los grados de libertad 22-107
- Simplificación de las ecuaciones de control 22-107
- Selección y diseño de los circuitos de control 22-107
- Configuración operación unitaria-operador-computador 22-108
- Optimización de las operaciones unitarias 22-108
- Control adaptable 22-109
- Ejemplos de control de operaciones unitarias por computadora 22-109

Control de los procesos unitarios por computadora 22-109
- Sistema de fraccionamiento 22-109
- Proceso de polimerización 22-111

Control de plantas de proceso por computadora 22-112
- Desarrollo del proyecto de control 22-112
- Simplificación de un sistema de control para un complejo industrial 22-114
- Optimización del proceso 22-115
- Ejemplo de una planta de etileno 22-116

Ecuaciones y modelos de control 22-116
- Controladores convencionales computarizados 22-116
- Controladores convencionales computarizados con entrada de múltiples variables 22-116
- Modelos de estado estacionario 22-117
- Modelos dinámicos 22-117

Computadoras para el control de procesos 22-117
- Requisitos generales de equipos (*hardware*) 22-118
- Equipos analógicos 22-118
- Equipos digitales 22-118
- Programas y sistemas de programación (*software*) 22-119

CONTROL DE OPERACIONES UNITARIAS

Control de intercambiadores de calor 22-120
- Control directo del vapor 22-120
- Control del condensado 22-120
- Control de la presión de vapor 22-120
- Métodos de control por derivación del flujo (*bypass*) 22-120
- Control de alimentación directa 22-120
- Control de la entalpía por medio de la alimentación directa 22-122

Control de columnas de destilación 22-125
- Controles básicos 22-125
- Controles de la calidad del producto 22-126
- Controles de entrada de calor 22-127
- Control predictivo 22-127

Control de la velocidad de producción de un reactor químico 22-128
- Sistema de un reactor usual 22-128
- Balance de calor del reactor 22-129

Control de operaciones de secado 22-130
- Secadores rotatorios 22-130
- Secadores de tambor 22-131
- Secadores de rocío 22-131

Control de operaciones por lotes o de arranque y detención 22-131
- Criterios para la eficiencia de arranque y detención 22-132
- Arranque de procesos continuos 22-133
- Control de reactores por lotes 22-134

Maximización de la eficiencia en operaciones unitarias continuas 22-135

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL

Desarrollo de un sistema de control 22-137
- Establecimiento de los objetivos de operación del proceso 22-137
- Definición de los objetivos del sistema de control 22-137
- Determinación de las restricciones del proceso 22-137
- Identificación de fuentes y características de las perturbaciones 22-137
- Determinación de las características dinámicas del proceso 22-137
- Examen de la factibilidad técnica y económica 22-138
- Consideración de soluciones alternativas 22-138
- Finalización del diseño del sistema de control 22-138
- Conclusión del desarrollo del sistema de control 22-138

Recursos para el análisis de sistemas de control 22-138
- Análisis de la respuesta a la frecuencia 22-138
- Verificación de pulsos 22-139
- Análisis mediante la reducción de los grados de libertad 22-140
- Modelos matemáticos 22-142
- Simulación 22-143

Costos de instrumentación 22-147
- Instrumentación en el punto de medición 22-147
- Instrumentación en un cuarto de control 22-147
- Control de la planta por computadora 22-148
- Análisis de la composición del proceso 22-148

FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO

REFERENCIAS GENERALES: Caldwell, Coon y Zoss, *Frequency Response for Process Control.* McGraw-Hill, New York, 1959. Considine, *Process Instruments and Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1957. Considine y Ross, *Handbook of Applied Instrumentation*, McGraw-Hill, New York, 1964. Coughanouer y Koppel, *Process Systems Analysis and Control*, McGraw-Hill, New York, 1965. Eckman, *Automatic Process Control*, Wiley, New York 1958. Gibson, *Nonlinear Automatic Control*, McGraw-Hill, New York, 1963. Harriott, *Process Control*, McGraw-Hill, New York, 1964. Liptak, *Instrument Engineers Handbook*, Chilton, Philadelphia, 1969. Murrill, *Automatic Control of Processes*, International Textbook, Scranton, Pa., 1967. Shinskey, *Process Control System*, McGraw-Hill, New York, 1967. Williams y Lauher, *Automatic Control of Chemical and Petroleum Processes*, Gulf, Houston, 1961.

Los procesos se controlan con mayor precisión para dar productos más uniformes y de más alta calidad, mediante la aplicación del control automático, lo cual representa con frecuencia mayores ganancias. Además, los procesos que responden con demasiada rapidez al control realizado por operadores humanos se pueden regular de manera automática. El control automático tiene también grandes ventajas en ciertas operaciones remotas, peligrosas o rutinarias. Después de un período de experimentación, las computadoras se están utilizando ahora para operar y controlar en forma automática sistemas de procesamiento, muchos de los cuales son demasiado grandes o complejos para que se puedan regular de un modo eficaz por medio del control humano.

Puesto que el beneficio del proceso es por lo común la ventaja más importante que se busca al aplicar el control automático, la calidad del control y su costo se deben comparar con los beneficios económicos esperados y los objetivos técnicos del proceso. Los beneficios económicos incluyen la reducción de los costos de operación, mantenimiento y producto fuera de especificaciones, junto con el mejoramiento de la funcionabilidad del proceso y una mayor producción.

Los costos de inversión pueden verse afectados si las consecuencias del control se reflejan en la selección del equipo de procesamiento. Esto requiere una interacción entre las personas que llevan a cabo el diseño del proceso y las que realizan el diseño del sistema de control. Si no se da una atención especial a esta interacción, ello conducirá al concepto de "adaptación" del diseño del sistema de control según el cual éste se suma simplemente al diseño del proceso para hacerlo operable.

SISTEMA GENERAL DE CONTROL

Los diferentes aspectos del control automático se comprenderán mejor si se describen con un ejemplo. Véase, por ejemplo, el proceso que se muestra en la figura 22-1. El líquido en movimiento se va a calentar a una temperatura deseada por medio de vapor que fluye por los serpentines de calentamiento. La temperatura del flujo de salida es afectada por factores (variables de proceso) como temperatura del líquido entrante, gasto del líquido, temperatura del vapor, gasto del vapor, capacidades caloríficas de los fluidos, pérdida de calor del depósito y velocidad de la mezcladora.

Sistemas de circuito abierto y cerrado El sistema ilustrado en la figura 22-1 se clasifica normalmente como de "circuito abierto". Los sistemas de control de *circuito abierto* son aquellos en que la información sobre la variable controlada (en este caso, la temperatura) no se emplea para ajustar cualquiera de las entradas del sistema, con el fin de compensar las variaciones de las variables del proceso. El término "circuito abierto" se encuentra con frecuencia en las exposiciones que tratan de sistemas de control, para indicar que se está estudiando la dinámica no controlada del proceso.

Un sistema de control de *circuito cerrado* implica que la variable controlada es la que se mide, y el resultado de esta medición sirve para manipular cualquiera de las variables de proceso, por ejemplo, el flujo de vapor.

Control de retroalimentación En el sistema de control de circuito cerrado, la información sobre la variable controlada se vuelve a alimentar como base para controlar una variable de proceso, de donde se le designa como "control de retroalimentación o alimentación inversa de circuito cerrado". Esta retroalimentación se logra a través de la acción de un operador (control manual) o por medio de instrumentos (control automático).

En el caso de *control manual*, según la figura 22-1, el operador mide periódicamente la temperatura; si ésta es, por ejemplo, inferior al valor deseado, el operador aumenta la circulación de vapor abriendo levemente la válvula. Cuando se trata de un *control automático*, se emplea un dispositivo sensible a la temperatura para producir una señal (eléctrica, neumática, etc.) proporcional a la temperatura medida. Esta señal se alimenta a un controlador que la compara con un valor deseado preestablecido, o punto de ajuste. Si existe una diferencia, el controlador cambia la abertura de la válvula de control de vapor para corregir la temperatura como se indica en la figura 22-2.

Control de alimentación directa El control de alimentación directa es de empleo general. Las perturbaciones de proceso se miden y compensan sin esperar a que un cambio en la variable controlada indique que ha ocurrido una perturbación. El control de alimentación directa es muy útil también en los casos en que la variable controlada final no se puede medir. En el ejemplo ilustrado en la figura 22-3, el controlador de alimentación directa tiene la capacidad de computar y utilizar el gasto medido de líquido de entrada y su temperatura, para calcular el gasto de vapor necesario para mantener la temperatura deseada en el líquido de salida.

La ecuación que resuelve el controlador relacionando el contenido calorífico del líquido de entrada, el flujo de vapor y la temperatura del líquido de salida, se designa usualmente como *modelo de proceso.* Es muy raro encontrar modelos y controladores perfectos, de manera que es más conveniente utilizar una combinación de control de retroalimentación y alimentación directa (véase la Fig. 22-4). La configuración de un controlador que proporciona el punto de ajuste para otro

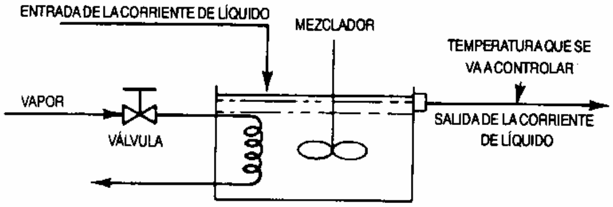


FIG. 22-1 Proceso sencillo de intercambio de calor.

:calor del depósito y

stema ilustrado en la
ircuito abierto". Los
os en que la informa-
a temperatura) no se
el sistema, con el fin
l proceso. El término
las exposiciones que
se está estudiando la

que la variable contro-
n sirve para manipular
el flujo de vapor.
de control de circuito
llada se vuelve a ali-
proceso, de donde se
alimentación inversa
ogra a través de la ac-
edio de instrumentos

2-1, el operador mide
nplo, inferior al valor
vapor abriendo leve-
utomático, se emplea
ducir una señal (eléc-
tura medida. Esta se-
con un valor deseado
iferencia, el controla-
le vapor para corregir

le alimentación direc-
: proceso se miden y
iable controlada indi-
il de alimentación di-
a variable controlada
) en la figura 22-3, el
acidad de computar y
su temperatura, para
ner la temperatura de-

ionando el contenido
r y la temperatura del
nodelo de proceso. Es
fectos, de manera que
le control de retroali-
22-4). La configura-
to de ajuste para otro

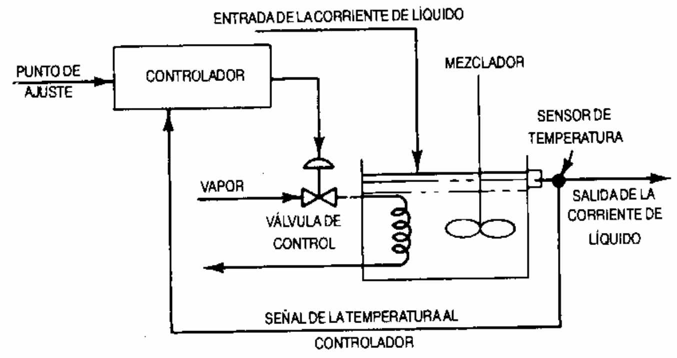


FIG. 22-2 Control automático de retroalimentación de un proceso de intercambio de calor.

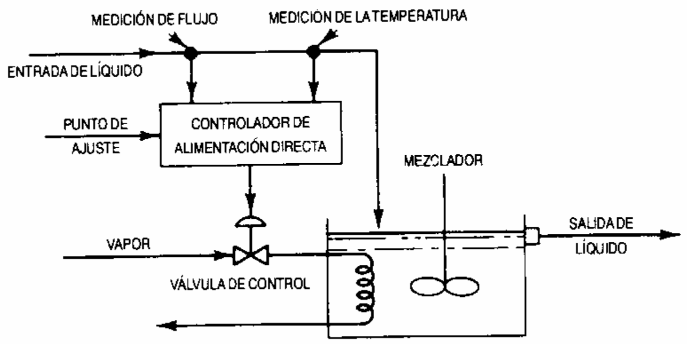


FIG. 22-3 Control de alimentación directa de un proceso de intercambio de calor.

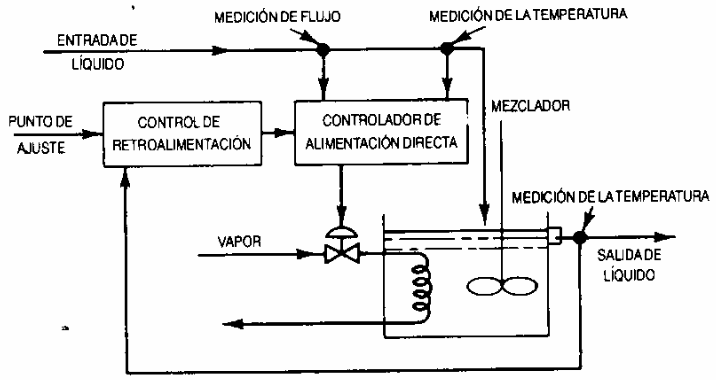


FIG. 22-4 Control combinado con alimentación directa y retroalimentación de intercambio de calor.

controlador se conoce como *control en cascada* y se emplea comúnmente en el control de retroalimentación.

Diagramas de bloques Estos diagramas muestran las relaciones entre las variables del sistema y constituyen el método estándar para representar sistemas para fines de análisis o estudio. Hay acuerdos ya establecidos para la construcción o el diseño de diagramas de bloques. Las líneas representan señales que pueden ser flujos o corrientes de información, material o energía. Una unión o juntura circular de totalización representa una suma algebraica de las señales de entrada en ese punto. Al lado de la flecha que va a la junta totalizadora se coloca un signo algebraico, (+) o (-), para indicar una suma o una resta, respectivamente. Un punto de ramificación o bifurcación de otra línea representa la división de una señal en más de una trayectoria sin modificaciones. Los rectángulos representan una modificación de la señal entrante y se utilizan para los elementos del sistema. En general, los rectángulos contienen notaciones que describen las características dinámicas del sistema que representan. Estas notaciones pueden incluir la ecuación diferencial, la constante para la conversión de unidades o la función de transferencia que relaciona la entrada y la salida del elemento.

El diagrama de bloques se obtiene directamente del sistema físico, dividiéndolo en secciones funcionales no interactuantes, cuyas entradas y salidas se identifican con facilidad. Los bloques se conectan en el mismo orden en que aparecen en el sistema físico.

El circuito de control de flujo neumático que se muestra en la figura 22-5 comprende seis secciones principales que se deben considerar; controlador, línea de transmisión *a*, válvula, placa de orificio, transmisor de presión diferencial y línea de transmisión *b*. Para este caso, las características de las válvulas representan el proceso que se está controlando, la circulación por la válvula es la salida de proceso *C* y el diagrama de bloques de este sistema es el que aparece en la figura 22-6.

El controlador tiene una entrada de referencia, o punto de ajuste *R*, que es el valor deseado para la señal de medición del proceso transmitida al controlador. Éste mide la diferencia o error entre el punto de ajuste y la señal de medición. El controlador maneja el error *E* para producir una salida *M*, que corrige la posición de la válvula para hacer que el error se reduzca a cero. En el diagrama de bloques, el controlador está representado por la unión totalizadora y el bloque de modalidades de control.

La salida del controlador alimenta la línea de transmisión *a*; el bloque que representa la línea de transmisión *a* tiene a *M*, la variable manipulada, como entrada y como salida a *A*. La línea de transmisión puede ser muy rápida, como sucede en los instrumentos electrónicos, de modo que $A = M$, o bien, puede ser lenta, como sucede en algunas instalaciones de instrumentos neumáticos, de tal manera que *A* tiene una demora o retraso en tiempo en relación con *M*. A su vez, la señal *A* regula la posición de la válvula de control, y esta posición y las características de la válvula determinan el gasto o velocidad de flujo a través de la misma. Del mismo modo, se agregan bloques para la placa de orificio, el transmisor de presión diferencial y la línea de transmisión *b*. El diagrama de bloques del sistema de retroalimentación de circuito cerrado genera un circuito cerrado cuando se expresa en la notación de diagramas de bloques.

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA UTILIZANDO LAS TRASFORMADAS DE LAPLACE

Definiciones y restricciones El comportamiento de estado estacionario y dinámico de un sistema se determina resolviendo la ecuación diferencial que representa dicho sistema. Esto puede representar una tarea prolongada y tediosa, sobre todo si el sistema se compone de muchos elementos. Una de las técnicas para resolver estas ecuaciones di-

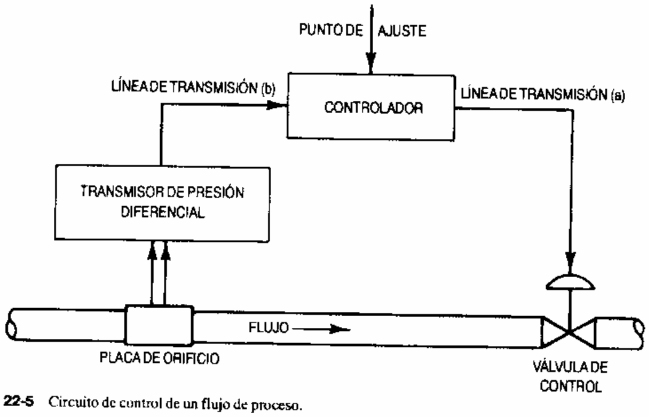


FIG. 22-5 Circuito de control de un flujo de proceso.

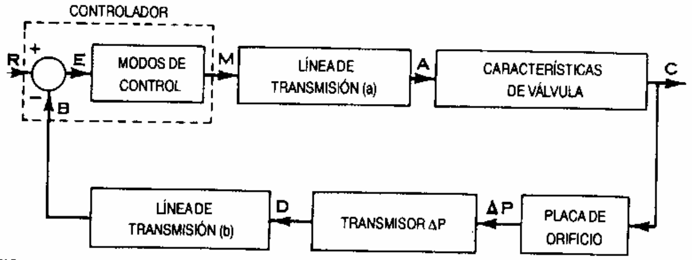


FIG. 22-6 Diagrama de bloques de un circuito de control de flujo especificando el equipo utilizado.

punto de ajuste R, que
proceso transmitida al
el punto de ajuste y la
r E para producir una
a hacer que el error se
ontrolador está repre-
odalidades de control.
ansmisión a; el bloque
a variable manipulada,
misión puede ser muy
icos, de modo que A =
s instalaciones de ins-
na demora o retraso en
gula la posición de la
ticas de la válvula de-
la misma. Del mismo
, el transmisor de pre-
grama de bloques del
nera un circuito cerra-
de bloques.

ZANDO LAS

nto de estado estacio-
olviendo la ecuación
uede representar una
a se compone de mu-
r estas ecuaciones di-

ferenciales es el empleo de la transformación creada por Laplace. En este caso, el problema se trata en términos de una segunda variable que permite resolverlo en forma algebraica. Así pues, mediante una nueva transformación a la variable independiente original, se obtiene la solución de la ecuación diferencial inicial (véase la Sec. 2).

Las transformadas de Laplace, a pesar de su gran utilidad, sólo se pueden aplicar a ecuaciones diferenciales de tipo lineal. Estas ecuaciones describen un sistema lineal al cual pueden aplicarse las reglas de superposición. Dicho de otra manera, si la respuesta de tiempo del sistema es $y_1(t)$ cuando se aplica una función de fuerza $x_1(t)$ y la respuesta es $y_2(t)$ cuando se aplica $x_2(t)$, entonces, si $x_1(t) + x_2(t)$ se aplica, la respuesta será $y_1(t) + y_2(t)$. Una ecuación diferencial lineal de este tipo es:

$$p_n(t)\frac{d^n y(t)}{dt^n} + p_{n-1}(t)\frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + p_0(t)y(t) = x(t) \quad (22\text{-}1)$$

en donde los coeficientes $p_i(t)$ no son funciones de la variable dependiente $y(t)$ o cualquiera de sus derivadas. Por lo común, la solución de una ecuación de esta índole, con coeficientes que varían con el tiempo, presenta ciertas dificultades. La mayor parte de las operaciones químicas son de tipo no lineal sobre una gama amplia; pero la suposición de linealidad en una región pequeña cercana al punto de operación se puede justificar casi siempre (lo que se llama linealización). Los coeficientes de esta ecuación diferencial linealizada son, casi siempre, independientes del tiempo. Por tanto, en lo que respecta al control del proceso, la ecuación diferencial básica del mismo adopta usualmente la forma:

$$m_n\frac{d^n y(t)}{dt^n} + m_{n-1}\frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + m_0 y(t) = x(t)$$

que se resuelve de manera rutinaria con las transformadas de Laplace.

Funciones de transferencia Para ilustrar la conveniencia de la transformación de Laplace, véase una ecuación diferencial expresada por

$$T\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = RMu(t) \qquad c(0) = 0 \qquad (22\text{-}2)$$

en este caso, T representa la constante de tiempo del sistema y $Mu(t)$ describe una entrada de escalón al sistema, de magnitud M. Se desea determinar la respuesta de la salida $c(t)$. Las transformadas $\mathcal{L}$ de Laplace que se requieren se toman de las tablas.

$$\mathcal{L}\left[\frac{dc(t)}{dt}\right] = sC(s) - c(0+)$$

$c(0+) = 0$, ya que las condiciones iniciales eran cero.

$$\mathcal{L}[c(t)] = C(s)$$
$$\mathcal{L}[Mu(t)] = M(1/s)$$

La transformada de Laplace de la ecuación (22-1) es, por tanto,

$$TsC(s) + C(s) = R(M/s)$$

$$C(s) = \frac{RM}{s(Ts+1)} \qquad (22\text{-}3)$$

Para transformar esta ecuación nuevamente al dominio de tiempo, se busca la transformada inversa $\mathcal{L}^{-1}$ y se encuentra que

$$c(t) = \mathcal{L}^{-1}[C(s)] = RM(1 - e^{-t/T})$$

En un sistema de muchos elementos, la ecuación transformada que corresponde a la ecuación (22-3) puede ser muy complicada. No obstante, casi siempre se puede manejar de tal modo que adquiera una forma para la cual se pueda encontrar la transformada inversa en una tabla.

En el trabajo de control de proceso, las transformadas de Laplace se utilizan para determinar las respuestas a perturbaciones o alteraciones. Los términos estado estacionario o constante se omitirán, casi siempre, en las soluciones de ecuaciones diferenciales, debido a que casi siempre se supondrá que las condiciones iniciales son cero.

La *función de transferencia* se define como la razón de una transformada de Laplace de la variable de respuesta (salida) a la transformada de Laplace de la variable de perturbación (entrada). Por lo que indica la ecuación (22-3), se obtiene la siguiente expresión para la función de transferencia $KG(s)$

$$KG(s) = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{C(s)}{M(s)} = \frac{R}{Ts+1} \qquad (22\text{-}4)$$

El acuerdo ya establecido para designar funciones de transferencia en un diagrama de control, es la expresión $KG(s)$. Las letras mayúsculas se utilizan cuando las funciones se encuentran dentro del dominio s, y las minúsculas sirven para indicar el dominio de tiempo. $G(s)$ representa la porción dinámica de la función de transferencia y K se relaciona con la ganancia de estado estacionario a través de un elemento. En la función de transferencia, la ecuación (22-4) $K = R$ y $G(s) = 1/(Ts + 1)$.

Una de las prácticas comunes consiste en dibujar un diagrama de bloques del dominio s, para omitir (s) en las expresiones de $F(s)$. Por el contrario, sólo se emplea la designación de letras mayúsculas para representar las transformadas del dominio s. En la figura 22-7 se ilustra un diagrama de bloques expresado en términos de funciones de transferencia, en donde H es la función de transferencia del dispositivo de medición de retroalimentación.

Combinación de funciones de transferencia Los sistemas de procesos fluidos y térmicos manifiestan varias características dinámicas distintas, pero muchos de ellos se pueden describir por medio de combinaciones de cinco funciones de transferencia.

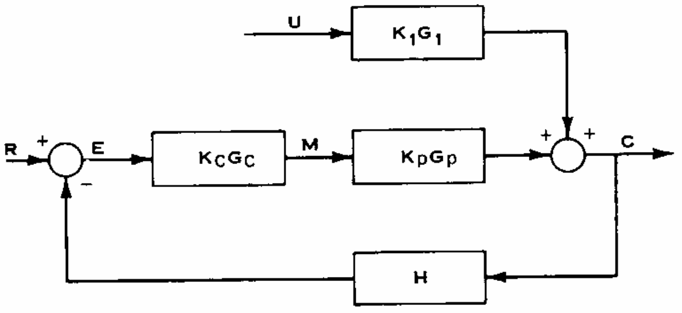


FIG. 22-7 Diagrama de bloques generalizado de un sistema de control con retroalimentación, en el cual se indica la función de transferencia de un proceso sujeto a una perturbación de carga.

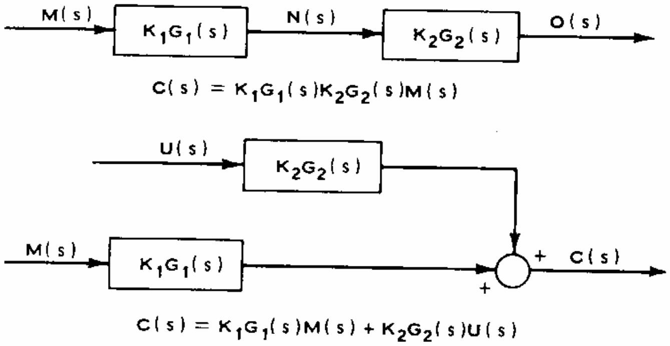


FIG. 22-8 Diagrama de bloques de elementos de proceso que utiliza la notación de la función de transferencia y las funciones de transferencia compuesta respectivas.

K	elemento proporcional
$1/Ts$	elemento de capacitancia
$1/(Ts+1)$	elemento de primer orden
$1/(T^2s^2+2\xi Ts+1)$	elemento de segundo orden
e^{-Ls}	elemento de tiempo muerto

Las funciones de transferencia son recursos importantes en el análisis de los sistemas de control. Cada bloque o elemento de dicho sistema tiene su propia función de transferencia característica. Si se utiliza la notación de función de transferencia en el dominio s, $KG(s)$ para cada bloque, los elementos del sistema se pueden combinar por medio de procedimientos algebraicos para obtener una expresión global para todo el sistema de control, como se ilustra en la figura 22-8. Entonces, sustituyendo las funciones de transferencia individuales y detalladas, se obtiene la función de transferencia global que permitirá realizar un análisis del sistema de control.

CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

Cuando se utilizan diagramas de bloques para analizar el sistema de control, es necesario conocer la función de transferencia que representa tanto al estado estático o estacionario como la del comportamiento dinámico de cada bloque. Para describir el comportamiento de un proceso físico es preciso definir las características específicas del mismo. Por definición, un bloque de proceso tiene una sola entrada y una sola salida; en el dominio s, la transformada de salida se determina multiplicando la transformada de entrada por la función de transferencia de dicho proceso. Cada bloque se puede describir utilizando los cinco elementos que se indicaron con anterioridad, o cualquier combinación de ellos.

Elemento proporcional La analogía de la resistencia eléctrica describe muchas características de sistemas de flujo, difusión y térmicos. La resistencia eléctrica se expresa por medio de la ley de Ohm.

$$R = \frac{e_1 - e_2}{i} = \frac{\Delta e}{i} = \frac{\text{diferencia potencial}}{\text{flujo de la corriente}}$$

en donde e = potencial, V; i = corriente, A; y R = resistencia, Ω.

En el flujo turbulento de un líquido, una pequeña abertura equivale a la resistencia eléctrica. La velocidad de flujo a través de esta restricción se expresa por medio de la ley de Bernoulli.

$$f = kA\sqrt{2g_c(h_1 - h_2)} \qquad (22\text{-}5)$$

en donde f = velocidad de flujo o gasto, k = coeficiente de flujo, A = área de la restricción, g_c = constante gravitacional, y h = carga de líquido (potencial). Se trata de una relación no lineal entre el flujo y el potencial, que es diferente al sistema eléctrico lineal. No obstante, se puede "linealizar" el sistema a un punto de operación específico, suponiendo que $h_1 - h_2$ es grande en comparación con el cambio registrado en $h_1 - h_2$ que se va a considerar. En otras palabras, la resistencia se define como sigue:

$$R_{f_0} = \left(\frac{\text{cambio de la diferencia de carga}}{\text{cambio de flujo}}\right)_{f_0} = \frac{d(h_1 - h_2)}{df}\Big|_{f_0}$$

en donde R_{f_0} se define para un valor de flujo f_0. Partiendo de esta definición y la ecuación (22-5), se obtiene

$$R_{f_0} = f_0/(gk^2A^2)$$

Por lo tanto, con una velocidad de flujo en particular f_0, un pequeño cambio en la diferencia de potencial $d(d_1 - h_2)$ generará un cambio proporcional en la velocidad de flujo. Obsérvese que, en este ejemplo, la resistencia no es una constante, sino que depende del gasto.

La respuesta transitoria de la salida de un elemento proporcional es idéntica a la entrada, excepto por la magnitud. Véase un cambio escalonado en la diferencia de carga para el ejemplo de flujo. En la figura 22-9 se representa el sistema de flujo linealizado en el dominio del tiempo. La respuesta de tiempo de f a un cambio escalonado en $h_1 - h_2$ cuando $t = 0$, aparece en la figura 22-10.

Según la nomenclatura del dominio s de Laplace, el elemento proporcional se designa, con frecuencia, como K. En este caso $K = 1/R_{f_0}$.

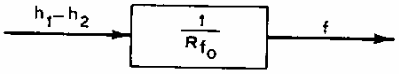


FIG 22-9 Diagrama de bloques del elemento de resistencia de un líquido.

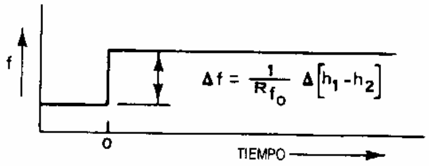


FIG. 22-10 Respuesta de tiempo de un elemento proporcional ante un cambio escalonado en el potencial, cuando el tiempo es igual a cero.

Elemento de capacitancia Para el elemento de capacitancia eléctrica, la ley de Faraday relaciona la carga de un capacitor con su capacitancia y la diferencia de potencial que se aplica.

$$C = q/e = \text{cantidad /potencial} \qquad (22\text{-}6)$$

en donde q = carga, C; C = capacitancia, F; y e = potencial, V. Según la definición de la corriente y la ecuación (22-6).

$$dq/dt = i = C\,(de/dt)$$

La capacitancia es un dispositivo de almacenamiento de energía. Dicho de otra manera, el flujo de corriente que entra al capacitor es el producto de la capacitancia y el índice de cambio del potencial.

La capacitancia de un líquido es directamente análoga a la capacitancia eléctrica, y se representa por medio de un tanque de compensación que se utiliza para almacenar líquido en forma temporal.

$$C_L\,(dh/dt) = f \qquad (22\text{-}7)$$

en donde C_l = capacitancia del líquido o área de la sección transversal. En el dominio s de Laplace, la ecuación (22-7) se convierte en

$$C_L sH(s) = F(s) \quad \text{o} \quad H(s) = \frac{1}{C_L s} F(s)$$

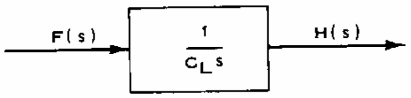


FIG. 22-11 Diagrama de bloques del elemento de capacitancia de un líquido.

El diagrama de bloques correspondiente se muestra en la figura 22-11. El término $1/C_L s$ es la función de transferencia. En la nomenclatura del dominio s de Laplace, este tipo de función de transferencia se designa usualmente como $1/Ts$, en donde $C_L = T$.

La respuesta de tiempo de este elemento de capacitancia a un flujo dado f_0 se deriva de la ecuación (22-7). Después de separar las variables e integrar, se obtiene

$$h = (f_0/C_L)\,t + k$$

Esta respuesta, que se ilustra en la figura 22-12, será no lineal cuando el área de la sección transversal del tanque no sea constante.

En la tabla 22-1 se presenta una lista de otras analogías de elemento de proceso proporcionales y de capacitancia.

Elemento de retraso de primer orden (elemento de la constante de tiempo) Un elemento de demora o retraso de primer orden se puede ilustrar por medio del nivel de líquido dentro del tar que que se muestra en la figura 22-13, en donde el flujo que sale del mismo se supone proporcional al nivel del tanque. La dinámica de este proceso se describe por medio de las expresiones

$$C_L\,(dh/dt) = f_1 - f_2 \qquad \text{y} \qquad f_2 = h/R_L$$

Por tanto,

$$R_L C_L\,(dh/dt) + h = R_L f_1 \qquad (22\text{-}8)$$

El producto RC aparece a menudo en los análisis de sistemas de control automático. Por analogía con la teoría de un circuito eléctrico, se le denomina *constante de tiempo* y casi siempre se designa como T. Las constantes de tiempo son, quizá, los indicadores más utilizados de las características de elementos de proceso. Al sustituir $T = R_L C_L$ y volver a expresar la ecuación (22-8) en el dominio s, se obtiene

$$(Ts + 1)H(s) = R_L F_1(s)$$
$$H(s) = R_L/(Ts + 1)\,F_1(s) \qquad (22\text{-}9)$$

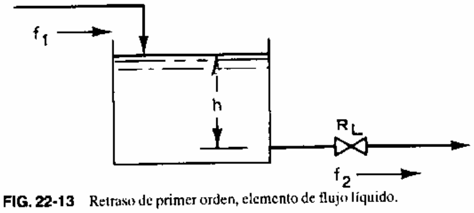


FIG. 22-13 Retraso de primer orden, elemento de flujo líquido.

FIG. 22-14 Diagrama de bloques de un flujo líquido, proceso con retraso de primer orden.

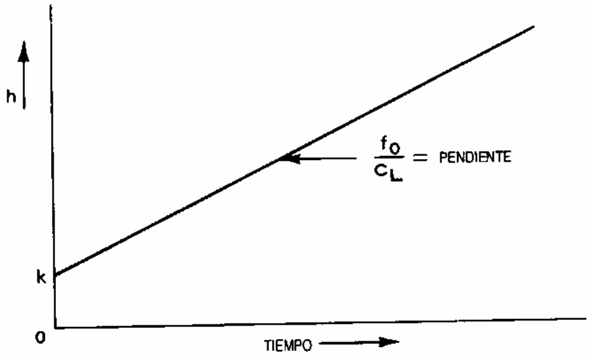


FIG. 22-12 Respuesta del elemento de capacitancia del líquido, para un flujo constante y una sección transversal constante.

TABLA 22-1 Algunas analogías de electricidad, flujo y calor

	Eléctricas	Flujo líquido	Flujo gaseoso	Flujo calorífico
Unidades de cantidad	q, coulomb	volumen, ft³	masa, lb	calor, Btu
Unidades de potencial	e, volt	carga líquida, ft	presión, lb_f/ft^2	temperatura, grados
Unidades de flujo	i, ampere, coulomb/seg.	gasto volumétrico, ft³/s	gasto masa, lb_m/s	flujo calorífico, Btu/s
Resistencia al flujo				
$R = \frac{\Delta(\text{potencial})}{\Delta(\text{flujo})}$	$R(\text{ohms}) = \frac{e_1 - e_2}{i}$	$R\left(\frac{\text{sec.}}{\text{ft.}^2}\right) = \frac{d(h_1 - h_2)}{df}$	$R\,\frac{1}{(\text{ft.})(\text{sec.})} = \frac{d(p_1 - p_2)}{dW}$	$R\left(\frac{(\text{grado})(\text{s})}{\text{B.t.u.}}\right) = \frac{d(T_1 - T_2)}{dq}$
Notación simbólica	$i \rightarrow$; e_1 —R— e_2	$f \rightarrow$; h_1 —⋈— h_2; R	$W \rightarrow$; p_1 —⋈— p_2; R	$q \rightarrow$ T_1 [R] T_2
Ecuación gobernante	$i = \frac{e}{R}$	$f = K\,S\,\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	$W = K_1 S\,\sqrt{g_c \rho_{av}(p_1 - p_2)}$	**Conducción** / **Convección**
		$= f_{ss} + \frac{\Delta(h_1 - h_2)}{R}$	$= W_{ss} + \frac{\Delta(p_1 - p_2)}{R}$	$q = kA\,\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = HA(T_1 - T_2)$
	R = constante	$R = \frac{f_{ss}}{K^2 S^2 g}$	$R = \frac{2W_{ss}}{K_1^2 S^2 g_c \rho_{av}}$	$= q_{ss}\,\frac{\Delta(T_1 - T_2)}{R}$
			en donde $p_1 - p_2 < 0.1p_1$	$R = \frac{\Delta x}{kA} = \frac{1}{HA}$
Capacidad				
$C = \frac{\Delta(\text{cantidad})}{\Delta(\text{potencial})}$	$C(\text{farad}) = \frac{q}{e} = \frac{i}{de/dt}$	$A(\text{ft.}^2) = \frac{\Delta V}{\Delta h}$	$C\left(\frac{(\text{lb.}_m)(\text{ft.}^2)}{\text{lb.}_f}\right) = \frac{\Delta M}{\Delta p}$	$C\left(\frac{\text{Btu}}{\text{grado}}\right) = MC_p = \frac{dQ}{dT}$
Notación simbólica	e —|(C; $i \rightarrow$	$f \rightarrow$ tanque A; $\uparrow h$	volumen constante; $W \rightarrow$ (p)	$q \rightarrow$ [T]
Ecuación gobernante	$e = e_0 + \frac{1}{C}\int i\,dt$	$h = h_0 + \frac{1}{A}\int f\,dt$	$p = p_0 + \frac{1}{C_1}\int W\,dt$	$T = T_0 + \frac{1}{C}\int q\,dt$

Subíndices: ss indica estado estacionario y 0 denota condición inicial

t = tiempo
S = área de restricción
A = área de la superficie líquida
Δx = espesor
g = 32.2 ft/seg²
g_c = 32.2 lbm. ft../lb seg²

ρ_{av} = densidad a la presión promedio
C_1 = para un gas ideal a volumen y temperatura constantes
R_g = constante de gas
C_p = calor específico a presión constante
K, K_1, k, y H son coeficientes apropiados

La función de transferencia de este elemento de retraso de primer orden es $R_I/(Ts + 1)$; véase la figura 22-14. La expresión R_I es un factor de magnitud que se presenta aquí, debido a que la carga o el potencial es la salida del elemento del proceso. Los elementos de retraso de primer orden se caracterizan por la expresión $1/(Ts + 1)$.

La respuesta de tiempo de una demora o retraso de primer orden se obtiene resolviendo la ecuación (22-8) para un cambio escalonado del flujo que entra, suponiendo que el tanque estaba inicialmente vacío. Después de reacomodar los términos, se obtiene

$$dh/(R_I f_1 - h) = dt/T \quad ; \quad f_1 = \text{constante}$$

Integrando entre los límites $h_0 = 0$ y h, se obtiene

$$-\ln(R_I f_1 - h)\Big|_{h_0}^{h} = \frac{t}{T}$$

$$h(t) = R_I f_1[1 - e^{-t/T}]$$

La gráfica de la salida del elemento de proceso correspondiente a un incremento escalonado unitario en la entrada que se muestra en la figura 22-15, demuestra que la constante de tiempo es el lapso que se requiere para llegar a $1 - e^{-1}$, que es el 63.2 % del valor final. El valor final de la salida será R, en donde $R = R_I f1$

Elemento de retraso de segundo orden (elemento cuadrático u oscilatorio El sistema de segundo orden es importante en el estudio de los sistemas de control automático, porque la respuesta real de un sistema controlado se compara a menudo con la de un sistema oscilatorio de segundo orden. Pocos procesos químicos de circuito abierto exhiben características oscilatorias; sin embargo, el sistema de control de circuito cerrado se ajusta a menudo, de tal modo que presente características similares al sistema oscilatorio de segundo orden.

Las características de un sistema de segundo orden se ilustran por medio del resorte, la masa y el sistema de amortiguamiento que se muestran en la figura 22-16. En la masa actúan cuatro fuerzas: **1)** la fuerza de desplazamiento de resorte kc, **2)** la fuerza de amortiguamiento dependiente de la velocidad $p\,dc/dt$, **3)** la fuerza de inercia dependiente de la aceleración $(W/g)(d^2c/dt^2)$ (g es la aceleración gravitacional), y **4)** la fuerza aplicada m. La salida de este elemento es el desplazamiento c. La ecuación que relaciona las fuerzas es

$$(W/g)(d^2c/dt^2) + p(dc/dt) + kc = m$$

Si el desplazamiento inicial y la velocidad son cero, las transformaciones de Laplace son las que se indican a continuación

$$\mathcal{L}[c(t)] = C(s) \quad \mathcal{L}\left[\frac{dc}{dt}\right] = sC(s) \quad \text{y} \quad \mathcal{L}\left[\frac{d^2c}{dt^2}\right] = s^2C(s)$$

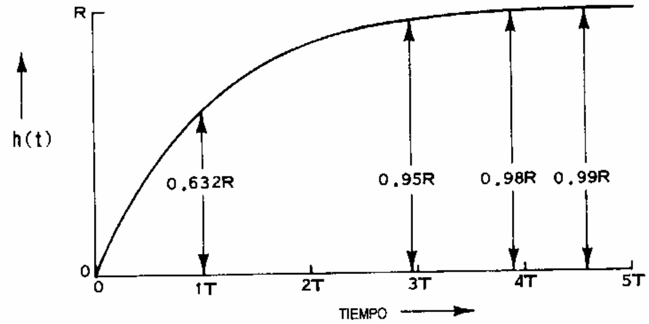


FIG. 22-15 Tiempo de respuesta de un retraso de primer orden generado por el incremento escalonado unitario en la entrada cuando el tiempo es igual a cero.

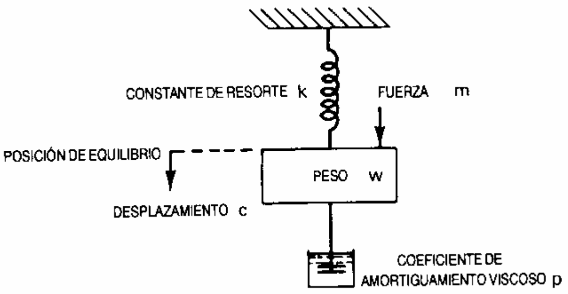


FIG. 22-16 Representación mecánica del movimiento oscilatorio.

Después de reacomodarla, la ecuación de la transformada resulta ser

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{1/k}{(W/gk)\,s^2 + (p/k)\,s + 1}$$

en donde $M(s)$ y $C(s)$ son, respectivamente, la entrada y la salida del sistema. Esta función de transferencia es característica de todos los retrasos cuadráticos. Para fines de exposición, conviene escribir esta función de transferencia en la forma estándar.

$$KG(s) = \frac{C(s)}{M(s)} = \frac{K}{T_c^2 s^2 + 2\xi T_c s + 1} \qquad (22\text{-}10)$$

en donde K = ganancia del sistema = $1/k$

T_c = tiempo característico = $\sqrt{W/gk}$

ξ = factor de amortiguamiento = $(p/2k)\,(1/T_c)$

La importancia de T_c y ξ se observa en la respuesta del sistema al cambio escalonado unitario en la entrada ilustrado en la figura 22-17. La respuesta depende del valor de ξ. Para $\xi < 1$, es del tipo oscilatorio, mientras que para $\xi > 1$, es de índole no oscilatoria. Los sistemas para los cuales $\xi > 1$ se denominan *sobreamortiguados*; y para $\xi < 1$, se llaman *subamortiguados*; y para $\xi = 1$, los sistemas reciben el nombre de *amortiguados críticamente*.

Para $\xi < 1$:

$$c(t) = K\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\,e^{-\xi(t/T_c)}\,\text{sen}\,(\omega_r t + \phi)\right] \qquad (22\text{-}11)$$

en donde $\omega_r = \dfrac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_c}$ y $\phi = \tan^{-1}\dfrac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} = \cos^{-1}\xi$

Para $\xi = 1$:

$$c(t) = K\left[1 - \left(1 + \frac{t}{T_c}\right)e^{-(t/T_c)}\right]$$

Para $\xi > 1$:

$$c(t) = K\left[1 - \frac{1}{\sqrt{\xi^2 - 1}}\,e^{-\xi(t/T_c)}\,\text{senh}\,(\omega_d t + \phi)\right]$$

en donde $\omega d = \dfrac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{T_c}$ y $\phi = \cosh^{-1}\xi$

La respuesta subamortiguada $\xi < 1$ se utiliza comúnmente para describir el funcionamiento del sistema de control. Por lo que indica la ecuación (22-11), se observan algunas relaciones específicas. La frecuencia de oscilación f es una función tanto de ξ como de T_c.

$$f = \omega_n/2\pi = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{2\pi T_c}$$

La frecuencia natural no amortiguada f_n para $\xi = 0$,

$$f_n = \omega_n/2\pi = 1/2\pi T_c \qquad (22\text{-}12)$$

define el tiempo característico T_c.

Los procesos químicos rara vez exhiben características oscilatorias, pero con frecuencia se representan por medio de varios retrasos de primer orden en serie. Dos retrasos de primer orden en serie (Fig. 22-18) se caracterizan por un sistema de segundo orden sobreamortiguado:

$$KG(s) = \frac{R_1}{T_1 s + 1}\,\frac{R_2}{T_2 s + 1} = \frac{R_1 R_2}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$$

Comparando esto con la ecuación (22-10), se obtienen los valores característicos de $K = R_1R_2$, $T_c^2 = T_1T_2$, y $\xi = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)/\sqrt{T_1T_2}$, $\xi > 1$, excepto para el caso $T_1 = T_2$, para el cual $\xi = 1$.

Retraso distancia-velocidad (elemento de tiempo muerto) El elemento de tiempo muerto, denominado comúnmente retraso distancia-velocidad, o retraso verdadero de tiempo, se encuentra con bastante frecuencia en los sistemas de procesos. Por ejemplo, si un elemento medidor de la temperatura se localiza corriente abajo de un intercambiador de calor, ocurre una demora de tiempo antes de que el fluido calentado que sale del intercambiador llegue al punto en el cual se mide la temperatura. Si algún elemento del sistema produce un tiempo muerto de L unidades de tiempo, entonces cualquier entrada $f(t)$ al elemento se reproducirá en la salida como $f(t - L)$. Al transformar esto al dominio s se obtiene

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \text{entrada}$$

$$\mathcal{L}[f(t - L)] = e^{-Ls}F(s) = \text{salida}$$

y

$$KG(s) = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{e^{-Ls}F(s)}{F(s)} = e^{-Ls}$$

Si eso se expresa en la notación del diagrama de bloques, se obtiene lo que se indica en la figura 22-19.

Retrasos de más alto orden Si un proceso se describe por medio de una serie de n retrasos de primer orden, la respuesta del sistema general se hace proporcionalmente más lenta con cada retraso agregado. El caso especial de una serie de n retrasos de primer orden con la misma constante de tiempo,

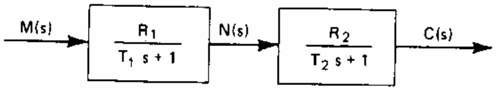


FIG. 22-18 Diagrama de bloques de dos retrasos de primer orden que forman uno de segundo orden.

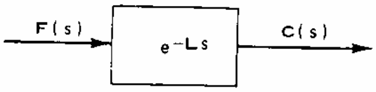


FIG. 22-19 Diagrama de bloques del elemento de tiempo muerto del proceso.

$$KG(s) = K/(Ts + 1)^n$$

se ilustra en la figura 22-20. Nótese que todas las curvas llegan, aproximadamente, al 60% de su valor final cuando $t = nT$.

Los sistemas de más alto orden se calculan en forma aproximada por medio de un sistema de primero o segundo orden más el tiempo muerto para el diseño del sistema de control. Analícese la respuesta de un sistema de quinto orden a una entrada de paso unitario (Fig. 22-21). Este sistema se puede representar por medio de un retraso de primer orden más un tiempo muerto,

$$KG(s) = Ke^{-Ls}/(Ts + 1)$$

en donde $T = t_1 - L$, siendo t_1 la constante de tiempo de la respuesta aparente. La ganancia del sistema K es la magnitud de respuesta al valor final, y el tiempo muerto L se expresa por medio del punto de intersección de la pendiente máxima con el eje del tiempo.

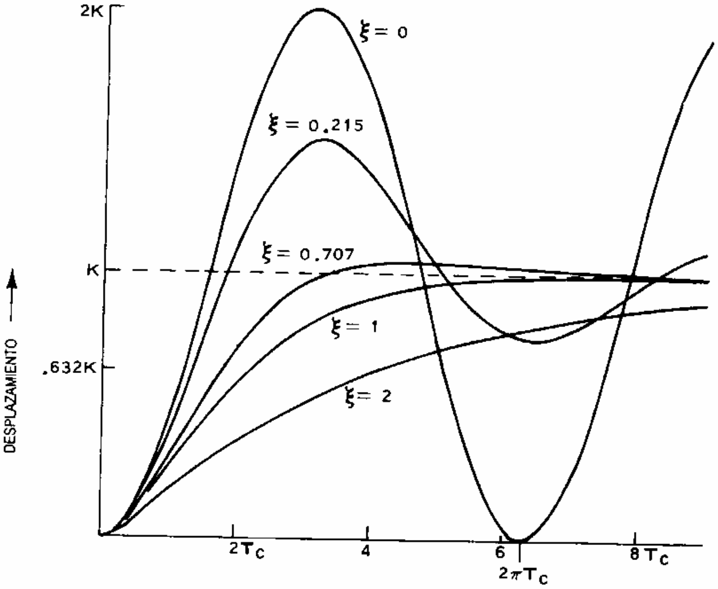


FIG. 22-17 Respuesta de tiempo de un sistema oscilatorio o de segundo orden, ante una perturbación escalonada unitaria, para varios valores del factor de amortiguamiento.

CARACTERI
RETROALIN

Cuando un cor
namiento depe
control, y del

C(s)

ner orden que for-

s)

nuerto del proceso.

urvas llegan, apro-
:T.
na aproximada por
is el tiempo muerto
espuesta de un sis-
)(Fig. 22-21). Este
so de primer orden

ipo de la respuesta
ud de respuesta al
nedio del punto de
tiempo.

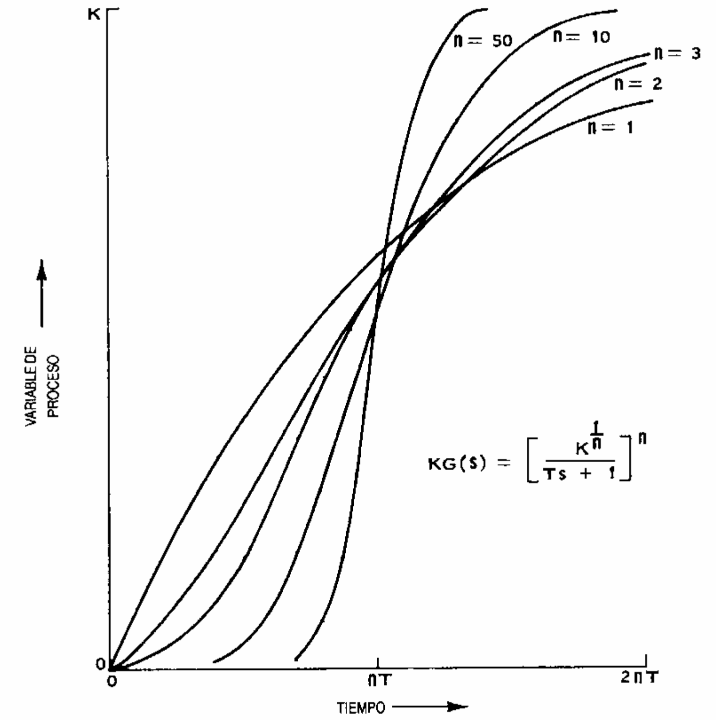


FIG. 22-20 Respuestas de los retrasos de n-ésimo orden a entradas escalonadas unitarias, en donde dichos retrasos se componen de n retrasos iguales de primer orden de la constante de tiempo T y la ganancia de estado estacionario $K^{1/n}$ en serie.

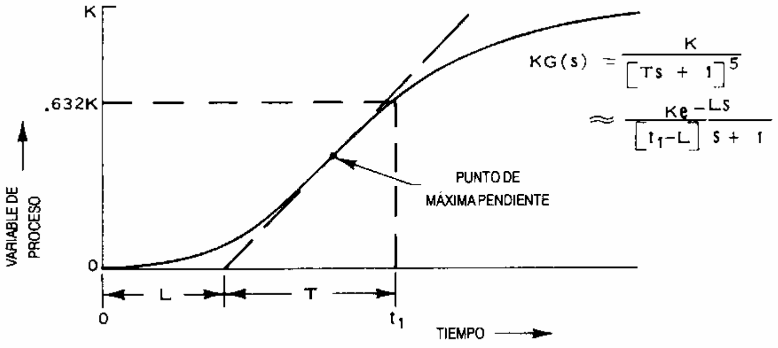


FIG. 22-21 Aproximación de un retraso de quinto orden mediante un tiempo muerto L, más un retraso de primer orden de la constante de tiempo $T = t_1 - L$.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN

Cuando un controlador automático se agrega a un proceso, el funcionamiento depende de la naturaleza del proceso, del tipo del equipo de control, y del cuidado con que se ajuste el controlador. Por ejemplo, para un cambio de punto de referencia, es deseable que el proceso llegue a su nuevo punto de operación tan rápidamente como sea posible. Desde un punto de vista ideal, en un proceso simple, esto significaría cambiar en forma instantánea la variable manipulada a su valor máximo o mínimo, y conservarla ahí hasta que el proceso llegue al nuevo valor deseado, y luego reajustar también en forma instantánea dicha variable a su nuevo valor de equilibrio. En la figura 22-22 se ilustran

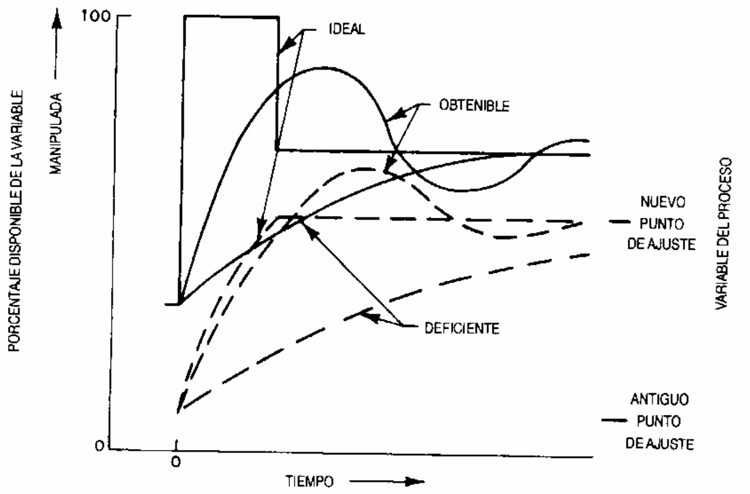


FIG. 22-22 Comparación de respuestas a un cambio escalonado del punto de ajuste para una acción de control idealizada, una acción de control normal obtenible y una acción de control deficiente. Las líneas continuas representan la porción de la variable manipulada disponible que se envía al proceso, y las líneas no continuas denotan la respuesta de la variable controlada.

tres grados de eficiencia del control automático de un proceso sencillo: condiciones idealizadas, funcionamiento obtenible y control reducido. El empleo de computadoras como controladores de proceso ha hecho posible controlar el funcionamiento de algunos procesos de una manera muy cercana a la acción idealizada que se ilustra en la figura 22-22.

Dentro de los requisitos económicos y técnicos del proceso, los dos objetivos que se buscan al aplicar un controlador automático a un proceso son: **1**) reducir el orden del sistema de proceso del controlador al orden práctico más bajo posible, y **2**) reducir la constante de tiempo del sistema de proceso del controlador al valor práctico más pequeño.

Cierre del circuito Muchos diagramas de bloques de sistemas de control con retroalimentación lineal se pueden reducir a la forma ilustrada en la figura 22-23. KG, que es la función de transferencia del circuito directo, incluye todos los elementos entre el sensor de error y la salida C, y H es la función de transferencia de la trayectoria de retroalimentación. El totalizador determina la diferencia entre el punto de ajuste R y la señal de retroalimentación B.

La relación entrada-salida C/R se determina basándose en las ecuaciones que describen cada bloque. Dicho de otra manera,

Totalizador: $E = R - B$

Trayectoria directa: $C = KGE$

Trayectoria de retroalimentación: $B = HC$

Después de hacer las sustituciones correspondientes en la ecuación del totalizador y resolver para C/R,

$$C/R = KG/(1 + KGH) \qquad (22\text{-}13)$$

Esta ecuación, que es una de las más útiles para el análisis de sistemas de control, describe cualquier sistema lineal que se puede reducir a la forma indicada en la figura 22-23. El numerador es la función de transferencia para circuito con alimentación directa y el denominador es uno más la función de transferencia del circuito directo por la función de transferencia del circuito de retroalimentación. Este producto se conoce como función de transferencia de circuito abierto. Si la ecuación (22-13) se vuelve a escribir, se tendrá

$$\frac{C}{R} = \frac{\text{función de transferencia del circuito directo}}{1 + \text{función de transferencia del circuito abierto}}$$

Control de encendido-apagado (*on-off*) La forma más simple y común es la de encendido-apagado (*on-off*), o de dos posiciones; por ejemplo, los termostatos muy conocidos que se utilizan en el calentamiento de ambiente, la refrigeración y el calentamiento de tanques. De las diversas variaciones del controlador, o relevador, de encendido-apagado, tres de las más conocidas se ilustran en la figura 22-24. El controlador con histéresis o banda muerta diferencial es el más común.

Para la conveniencia del análisis, el controlador de encendido-apagado se describe comúnmente como un dispositivo de tres posiciones, en donde la salida, que es la variable M, está dada por

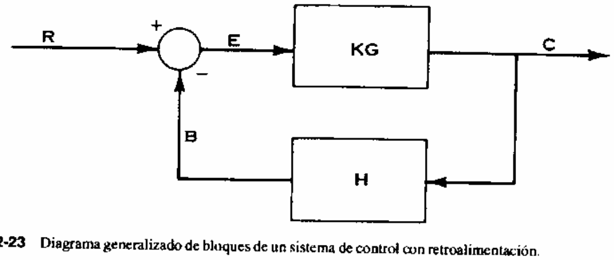


FIG. 22-23 Diagrama generalizado de bloques de un sistema de control con retroalimentación.

$$M = M_0 \text{ señal } E = \begin{cases} +M_0 \text{ para } E > 0 \\ 0 \text{ para } E = 0 \\ -M_0 \text{ para } E < 0 \end{cases}$$

en donde M_0 es el valor máximo de la variable manipulada disponible. En muchos casos, $+M_0$ corresponde a la variable de proceso que se está encendiendo, y $-M_0$ la que se apaga. En estos casos, la condición cero se elige como un punto intermedio dentro de la gama de operación, para fines de un análisis matemático.

En la figura 22-25 se puede ilustrar este tipo de controlador en forma de diagrama de bloques.

Aunque el controlador puede tener poca histéresis, las demoras en el dispositivo de medición de la variable controlada y el proceso se encuentran en el circuito de control. Invariablemente, estas demoras o retrasos hacen que la variable manipulada oscile en torno al punto de ajuste, como se observa en la figura 22-26. Si se agrega una banda diferencial al controlador, la amplitud de oscilación se incrementa y la frecuencia se reduce. Si el ciclo de trabajo, que es la fracción del tiempo en la posición de encendido, difiere del 50%, el promedio de tiempo de la variable controlada no será por lo común igual al punto de ajuste. La desviación del promedio en relación con el punto de ajuste se denomina *derivación*.

Control proporcional

Acción proporcional La salida de un controlador proporcional es un múltiplo fijo del error medido; dicho de otra manera, un controlador proporcional es, sencillamente, un multiplicador.

Los dos términos que se encuentran con mayor frecuencia al describir los controladores proporcionales, son la banda proporcional PB y la ganancia del controlador K_c. *La ganancia del controlador* es la cantidad por la cual se multiplica el error para obtener la salida. Muchos controladores se calibran en PB en lugar de la ganancia. Aunque hay muchas definiciones, la *banda proporcional* se da, casi siempre, por $PB = 100\%/K_c$. Un valor menor de PB da una mayor ganancia.

Control proporcional de un proceso de primer orden La función de transferencia correspondiente al sistema ilustrado en la figura 22-13 se desarrolló con anterioridad [Ec. (22-9)]. En la figura 22-27 se ilustra un sistema de control simple para mantener una carga constante C en el mismo tanque.

En este sistema de control, el nivel se mide y se transduce en la señal B. El valor de B se compara con la señal que representa el nivel deseado R, que es el punto de ajuste o referencia. La diferencia es el error E que se amplifica K_c veces por la ganancia del controlador proporcional. La salida del controlador, la variable manipulada M, mueve una válvula que cambia el flujo A, y por lo tanto, el nivel, a la salida de proceso C. Esto produce una variación en B y el error se aproxima a cero.

Para analizar el sistema, primero se traza el diagrama de bloques del mismo suponiendo lo siguiente: el transductor del nivel produce una señal equivalente a la carga $B = C$; la válvula es lineal y permite que circulen K_2 unidades de flujo por cada unidad de salida del controlador MK_2 = flujo de entrada, y tanto la válvula como el transductor se activan en forma instantánea. Si se emplean estas suposiciones y la función de transferencia para el tanque [Ec. (22-9)], se obtendrá el diagrama de bloques del sistema de control (Fig. 22-28).

Al aplicar la ecuación general de circuito cerrado [Ec. (22-13)] la relación entre C y R se expresa de manera directa:

$$\frac{C}{R} = \frac{K_cK_2R_L/(Ts+1)}{1+[K_cK_2R_L/(Ts+1)]} = \frac{K_cK_2R_L/(1+K_cK_2R_L)}{[T/(1+K_cK_2R_L)]\,s+1} \quad (22\text{-}14)$$

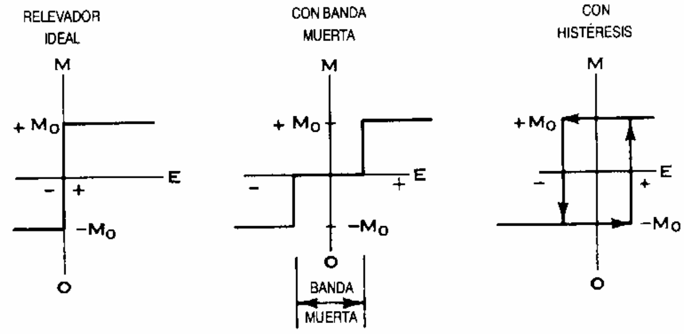


FIG. 22-24 Características operacionales de relevadores o conmutadores de control de encendido-apagado (*on-off*), comparadas con el relevador ideal.

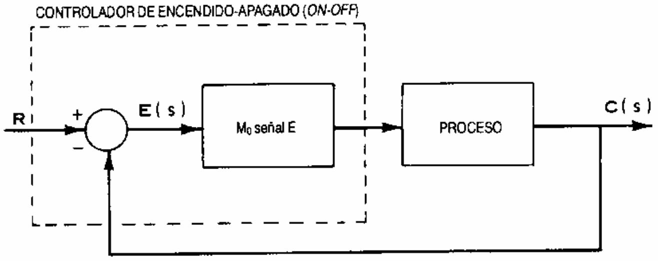


FIG. 22-25 Diagrama de bloques de un controlador de encendido-apagado aplicado a un proceso.

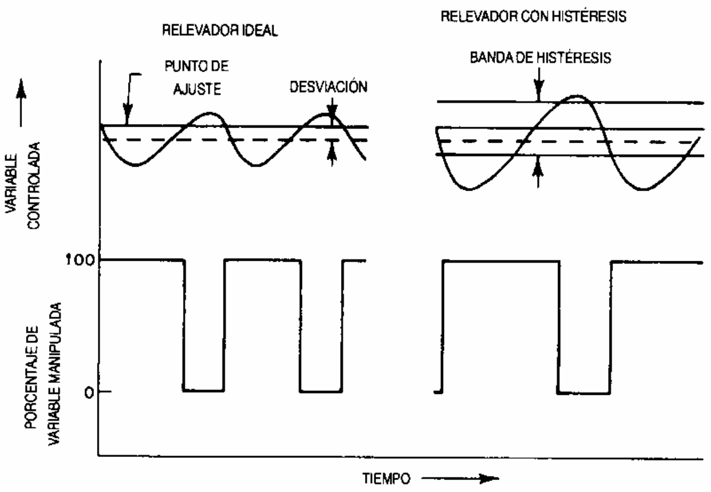


FIG. 22-26 Relación entre la variable controlada y la variable manipulada para un relevador ideal y un relevador con histéresis, en un proceso con retrasos en el circuito de control.

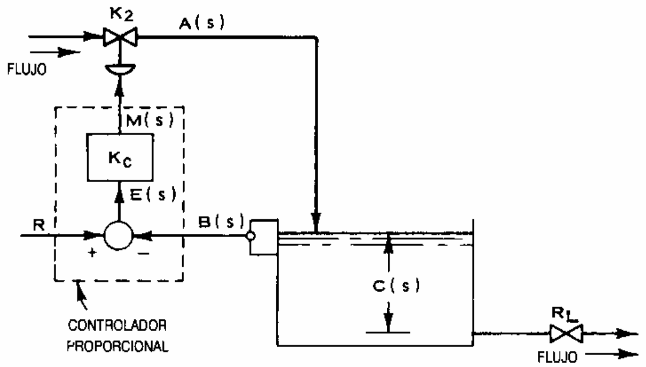


FIG. 22-27 Control proporcional de un retraso de primer orden en un sistema de nivel de líquido.

Si se compara la ecuación (22-14) con la (22-9), se observará que se trata de un retraso de primer orden con una constante de tiempo de $T/(1 + K_cK_2R_L)$ y un valor de estado estacionario de C igual a $K_cK_2R_L/(1 + K_cK_2R_L)$ después de un paso unitario en R. Este valor de estado estcionario se denomina, a veces, *ganancia del sistema* o *ganancia aparente del proceso*.

Para fines de comparación, obsérvese la respuesta del circuito abierto de este sistema (Fig. 22-29). Esto corresponde a un control manual, en donde el tiempo entre los ajustes es, por lo común, prolongado en comparación con las constantes de tiempo del proceso. Partiendo de este diagrama de bloques, la función de transferencia de circuito abierto es

$$C/M = K_2R_L/(Ts + 1)$$

Este es un retraso de primer orden con una constante de tiempo T. El valor final de C después de un paso unitario en M es K_2R_L, la ganancia del proceso. Comparando los valores de estado estacionario de la variable de salida para operaciones de circuito abierto y cerrado, cuando $M = R$, es evidente que el valor de circuito abierto es mayor por $K_2R_L\,[1 - K_c/(1 + K_cK_2R_L)]$. Esta diferencia en el valor del estado estacionario se denomina desviación. Así, con un control proporcional, la salida no es igual que el punto de ajuste y la *desviación* es equivalente a $R - C$.

De este modo, el control proporcional de un proceso de primer orden reduce la constante de tiempo del sistema, reduce también la ganancia aparente del proceso e introduce una desviación que se puede disminuir utilizando valores elevados en la ganancia del controlador K_c. Si en el circuito de control está presente más de un retraso, una ganancia proporcional elevada puede provocar una acción oscilatoria.

Control proporcional de un proceso de segundo orden Véase una vez más el nivel de líquido, suponiendo que la válvula tiene cierto retraso. La respuesta dinámica de una válvula se calcula, más o menos, en forma aproximada, por medio del retraso de primer orden. La cons-

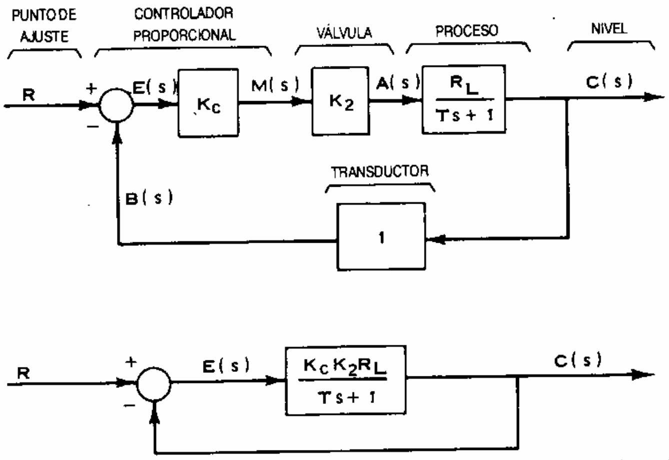


FIG. 22-28 Diagrama de bloques detallado y combinado de un control proporcional de retraso de primer orden, para un sistema de nivel de líquido.

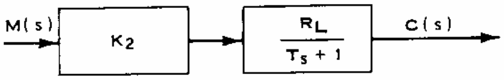


FIG. 22-29 Diagrama de bloques de un circuito abierto para un retraso de primer orden en un sistema de nivel de líquido.

tante de tiempo del retraso depende del tamaño de la válvula, las características del abastecimiento de aire, del hecho de que se utilice un posicionador de válvula, etc.

$$A/M = K_2/(T_2s + 1)$$

K_2 tiene las mismas unidades que antes, y T_2 es la constante de tiempo de la válvula.

Si las otras cantidades del circuito se mantienen sin ninguna alteración, los diagramas de bloques serán como se indica en la figura 22-30. Mediante la sustitución directa en la ecuación general de circuito cerrado [Ec. (22-13)]:

$$\frac{C}{R} = \frac{K_cK_2R_L}{1 + K_cK_2R_L}$$

$$\times \frac{1}{[T_1T_2/(1 + K_cK_2R_L)]s^2 + [(T_1 + T_2)/(1 + K_cK_2R_L)]s + 1}$$

Esta ecuación tiene la misma forma que la (22-10), lo cual indica que este sistema controlado posee las mismas características que el sistema de resorte, masa y amortiguador. La respuesta escalonada o de paso será semejante a las curvas de la figura 22-17. Los términos K_c, K_2, R_L, T_1 y T_2 se combinan para describir el sistema como se indica en las ecuaciones (22-11) y (22-13).

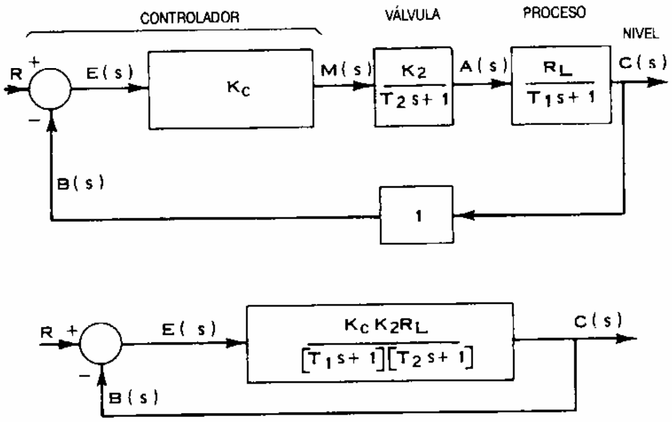


FIG. 22-30 Diagrama de bloques detallado y combinado de un control proporcional con retraso de segundo orden, para un sistema de nivel de líquido.

estado estacionario
to abierto y cerrado,
to abierto es mayor
n el valor del estado
control proporcio-
y la *desviación* es

proceso de primer
, reduce también la
desviación que se
a ganancia del con-
sente más de un re-
e provocar una ac-

lo orden Véase una
lvula tiene cierto re-
lcula, más o menos,
mer orden. La cons-

$$K = \text{ganancia del sistema} = \frac{K_c K_2 R_L}{1 + K_c K_2 R_L}$$

$$T_c = \text{tiempo característico} = \sqrt{\frac{T_1 T_2}{1 + K_c K_2 R_L}}$$

$$\xi = \text{factor de amortiguamiento} = \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2 (1 + K_c K_2 R_L)}}$$

$$f_n = \text{frecuencia natural} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1 + K_c K_2 R_L}{T_1 T_2}}$$

Por lo que se indica en la figura 22-17, se observa que la velocidad de respuesta se determina mediante el tiempo característico. La forma general de la curva de respuesta está determinada por el factor de amortiguamiento, de donde, si la respuesta del sistema se va a cambiar, se deben regular T_c y/o ξ. K_c, que es la ganancia del controlador, es la única variable que se puede manejar con facilidad a fin de modificar la respuesta.

Para un cambio de paso unitario en R, la alteración en el valor de estado estacionario de C es $K_cK_2R_L/(1 + K_cK_2R_L)$. La desviación sigue estando presente y es exactamente la misma cantidad que antes.

Un incremento en la ganancia del controlador acelera el tiempo de respuesta, tiende a hacer que la salida tenga una sobremodulación más amplia y oscile después de un cambio de paso en el punto de ajuste (o perturbación de carga), que aumente la frecuencia de oscilación y disminuya la magnitud de la desviación. Si la ganancia disminuye al punto en que ξ es igual o mayor que 1.0, la respuesta no tendrá sobremodulación y será muy lenta. Por tanto, varias características de respuesta del sistema controlado se ven afectadas por el ajuste de la ganancia del controlador.

Control proporcional más reajuste (Control PI)

Acción proporcional más reajuste del controlador La función de transferencia de un controlador proporcional más reajuste de tipo ideal es

$$\frac{M}{E} = K_c\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \qquad (22\text{-}15)$$

en donde T_i = tiempo de reajuste. Al transformar la ecuación (22-15) al dominio del tiempo,

$$m = K_c e + \frac{K_c}{T_i}\int e\,dt$$

La salida del controlador se compone de dos partes: la primera de ellas es proporcional al error y la segunda es proporcional a la integral del error. En consecuencia, el controlador tiene acción proporcional e integral, o acción proporcional más reajuste, que es como normalmente se llama. La acción de reajuste hace que la salida del controlador cambie en tanto exista un error. Incluso los errores pequeños proporcionan finalmente la suficiente salida de controlador para hacer que el error se reduzca a cero, que es el propósito principal de la acción de reajuste.

La respuesta de circuito abierto del controlador a un cambio de paso unitario en el error aparece ilustrada en la figura 22-31 para un controlador neumático ideal de 20.7 a 103.4 kPa (3 a 15 lbf/in^2), en donde $K_c = 4$ y $T_i = 2$ min. T_i denominado tiempo de reajuste o tiempo integral, es el tiempo requerido para que la porción integral de salida del controlador se haga igual que la porción proporcional con un error constante.

Hay dos métodos populares para designar la restauración o reajuste en los controladores. La perilla de reajuste del controlador se puede calibrar en *tiempo de reajuste*, que usualmente se menciona como minutos por repetición, que son los minutos que deben transcurrir para repetir el cambio inicial de acción proporcional en la salida del controlador. En algunos modelos, el reajuste se calibra en *razón de reajuste* $1/T_i$, o sea, *repeticiones por minuto*.

Control proporcional más reajuste de un proceso de primer orden Si se coloca un controlador proporcional más reajuste en el sistema de control de nivel ilustrado en la figura 22-27, se obtendrá la configuración de la figura 22-32 y el diagrama de bloques que aparece en la figura 22-33. Si T_i se hace igual que T (un ajuste óptimo de controlador según varios criterios), el diagrama de bloques se reduce al que aparece en la figura 22-34.

Después de hacer las sustituciones correspondientes en la ecuación general de circuito cerrado,

$$\frac{C}{R} = \frac{K_cK_2R_L/Ts}{1 + K_cK_2R_L/Ts} = \frac{1}{(T/K_cK_2R_L)s + 1} \qquad (22\text{-}16)$$

Esta función de transferencia representa una demora o retraso de primer orden con una constante de tiempo similar a la que se obtuvo con el controlador proporcional. No obstante, el valor de estado estacionario de C/R que sigue al cambio de paso unitario en R es 1. Eso significa

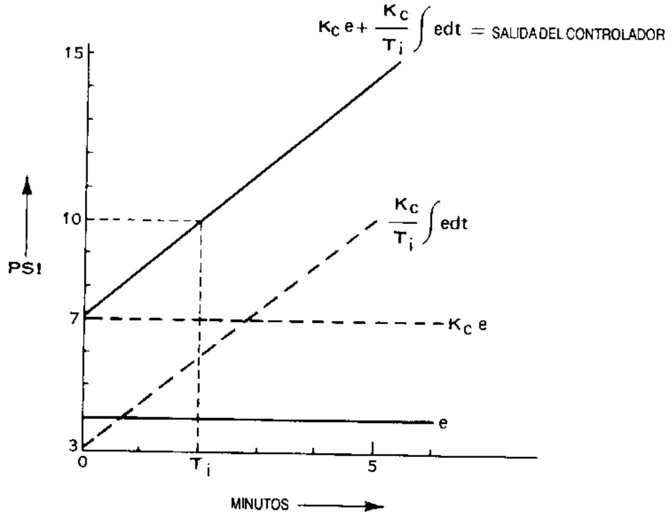


FIG. 22-31 Respuesta de circuito abierto de un controlador PI para un cambio escalonado unitario en el error.

que no hay c
descado.
La acción
respuesta en
en comparac
minado la de
Control pi
den En la fig
ma de segund
de transferen

R +

FIG. 22-34
retraso de prim

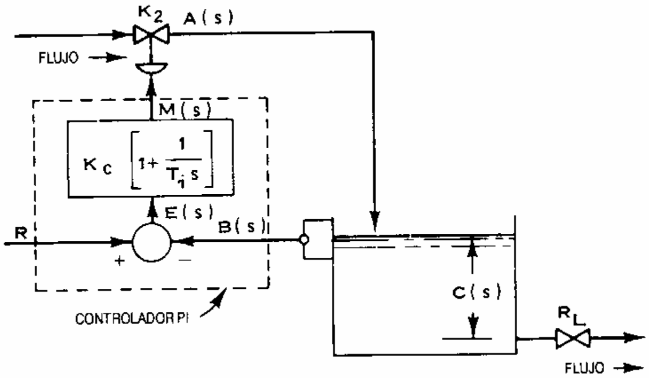


FIG. 22-32 Control proporcional más reajuste de un retraso de primer orden para un sistema de nivel de líquido.

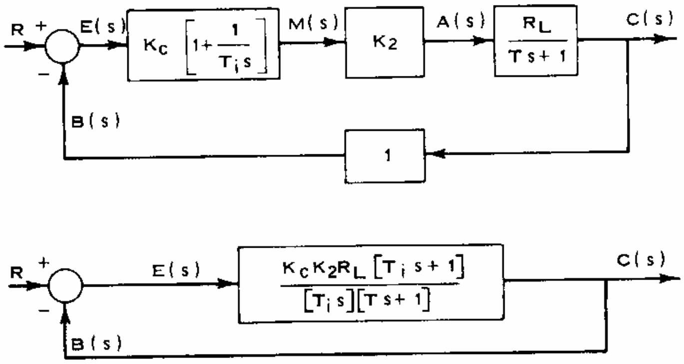


FIG. 22-33 Diagramas de bloques detallado y combinado de un control PI de retraso de primer orden para un sistema de nivel de líquido.

que no hay desviación, y la salida se dirigirá al punto de referencia deseado.

La acción proporcional más reajuste ha reducido la velocidad de la respuesta en comparación con el control proporcional. Sin embargo, en comparación con el control manual, ha acelerado la respuesta y eliminado la desviación (véase la tabla 22-2).

Control proporcional más reajuste de un proceso de segundo orden En la figura 22-35 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de segundo orden sobreamortiguado, con un control PI. La función de transferencia de circuito cerrado es

$$\frac{C}{R} = \frac{\dfrac{K_cK_2}{T_i}\,\dfrac{1+T_is}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}}{1+\dfrac{K_cK_2}{T_i}\,\dfrac{1+T_is}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}}$$

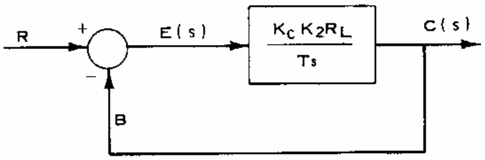


FIG. 22-34 Diagrama de bloques de un control PI restaurado y ajustado de retraso de primer orden, para un sistema de nivel de líquido.

TABLA 22-2 Control para procesos de nivel de líquido de primer orden

Variable	Manual	Proporcional	Proporcional más reajuste
		Tipo de control	
Constante de tiempo	T	$\frac{T}{1+K_cK_2R_L}$	$\frac{T}{K_cK_2R_L}$
Valor final de $\frac{C}{R}$	K_2R_L	$\frac{K_cK_2R_L}{1+K_cK_2R_L}$	1

Se pueden utilizar varios métodos para elegir K_c y T_i con el fin de obtener una expresión de C/R de orden más bajo. Es factible lograr una aproximación de selecciones para K_c y T_i, seleccionando $T_i = T_2$, en donde $T_2 > T_1$. En efecto, esta elección asegura la cancelación de la constante de tiempo más grande del sistema, de manera que,

$$\frac{C}{R} = \frac{1}{(T_iT_1/K_cK_2)s^2 + (T_i/K_cK_2)s + 1} \tag{22-17}$$

Por lo tanto, el funcionamiento de circuito cerrado es de segundo orden. Si se compara la ecuación (22-17) con la (22-10) se obtiene

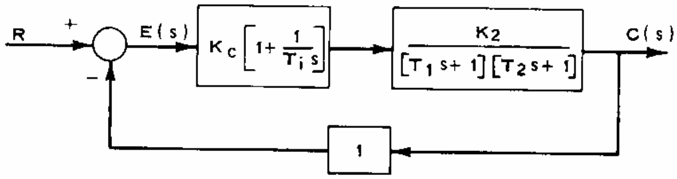


FIG. 22-35 Diagrama de bloques de un proceso sobreamortiguado de segundo orden, regulado con un controlador PI. $T_1 \neq T_2$.

$$T_c = \sqrt{\frac{T_1 T_i}{K_c K_2}} \quad \text{y} \quad \xi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_i}{K_c K_2 T_1}}$$

A partir de estos resultados, se elige un valor de K_c que dé un valor deseado de T_c o ξ. Como indica la ecuación (22-17), el controlador proporcional más reajuste sirve para que el sistema de segundo orden elimine la desviación. El hecho de agregar la acción de restauración o reajuste al sistema de segundo orden no altera el que éste pueda ser oscilatorio si la ganancia se eleva lo suficiente.

Control proporcional más reajuste más rapidez de cambio (PID)

Acción de velocidad o derivada El propósito primordial de la acción de velocidad, rapidez de cambio o derivada consiste en acelerar la acción del control. Esto lo logra determinando por anticipado a dónde se dirige un proceso y aplicando la corrección necesaria para detener el cambio del error. Se "anticipa" midiendo la rapidez de cambio del error y aplicando una acción de control proporcional a dicha velocidad (o índice) de cambio. La acción derivada es de gran utilidad para los procesos de alto orden con una inercia importante, es decir, una respuesta de iniciación lenta a un cambio en la variable manipulada.

El controlador proporcional más velocidad de tipo ideal tiene la función de transferencia

$$M/E = K_c(1 + T_d s)$$

en donde T_d = velocidad (índice) o tiempo de la derivada (la base de tiempo en que se mide el cambio de error). En el dominio del tiempo,

$$m = K_c e + K_c T_d\,(de/dt)$$

Por lo tanto, la salida del controlador es proporcional tanto a la magnitud del error como a su velocidad de cambio.

Las características de un controlador proporcional más velocidad (PD) de tipo ideal se ilustran en la figura 22-36, en donde se supone que el error aumenta con una velocidad constante. T_d es el tiempo necesario para que la salida del controlador duplique el valor de la respuesta proporcional. En otras palabras, T_d es la base de tiempo sobre la que se calcula la acción derivada.

En el control PD, la acción de control de rapidez de cambio se añade a la acción de control proporcional. La magnitud de la acción de rapidez de cambio depende de la ganancia proporcional, el tiempo nominal y la velocidad de cambio del error. Sin embargo, esto no contribuye a reducir la desviación.

La acción de velocidad rara vez se utiliza en los sistemas de control con grandes cantidades de interferencia o ruido. Puesto que el ruido es una señal que varía con gran rapidez, la acción de velocidad que provoca es sustancial. En ciertas condiciones, el controlador puede incrementar la amplitud de pico a pico de la interferencia y, por tanto, ser indeseable. Esta posibilidad hace que muchos operadores de proceso eviten el empleo de una acción de velocidad en lugares en que se podría utilizar con provecho, sacrificando parte del buen desarrollo del proceso.

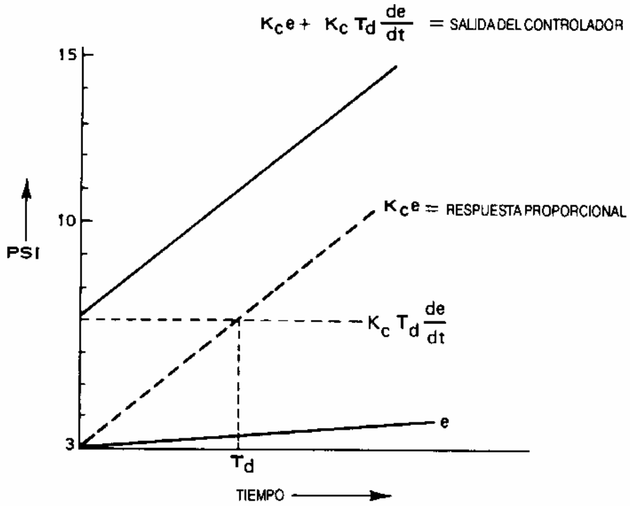


FIG. 22-36 Respuesta de un controlador PD de circuito abierto a un error uniformemente creciente.

lerivada (la base de
ominio del tiempo,

ıal tanto a la magni-

onal más velocidad
londe se supone que
s el tiempo necesa-
alor de la respuesta
mpo sobre la que se

de cambio se añade
le la acción de rapi-
l, el tiempo nominal
sto no contribuye a

os sistemas de con-
nido. Puesto que el
cción de velocidad
nes, el controlador
la interferencia y,
que muchos opera-
n de velocidad en
sacrificando parte

Controladores de tres modalidades (PID) El controlador de tres modalidades combina las acciones de elementos proporcionales, integrales y de derivada en una sola unidad. El principal efecto de los diferentes elementos es el siguiente:

1. *Proporcional (ganancia)* En general, le da forma a la curva de respuestas: las ganancias superiores generan por lo común respuestas transitorias más rápidas, aunque también de mayor oscilación.
2. *Integral (reajuste)* Elimina la desviación de estado estacionario.
3. *Derivada (velocidad)* Permite obtener ganancias proporcionales superiores en sistemas de más alto orden.

La función de transferencia precisa para un controlador PID depende del fabricante y el tipo de que se trate. La función de transferencia PID ideal está dada por

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad (22\text{-}18)$$

Las funciones de transferencia para dos controladores reales usuales son:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c\,\frac{1 + T_i s}{T_i s}\,(1 + T_d s)$$

y

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c\,\frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s}\,\frac{1 + T_d s}{1 + \beta T_d s}$$

en donde $\alpha, \beta \approx 0.1$

Control PID de un proceso de segundo orden En la figura 22-37 se ilustra el diagrama de bloques de un sistema de segundo orden que cuenta con un controlador PID. Si se combinan las funciones de transferencia y se obtiene la función de transferencia de circuito cerrado, resulta

$$\frac{C}{R} = \frac{\dfrac{K_c K_2}{T_i}\,\dfrac{1 + T_i s + T_i T_d s^2}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}}{1 + \dfrac{K_c K_2}{T_i}\,\dfrac{1 + T_i s + T_i T_d s^2}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}}$$

Esta función de transferencia es bastante compleja, y el diseño de un controlador PID para sistemas de alto orden de esta índole, se desarrolla casi siempre aplicando otras técnicas. Se ob[illegible]trá mayor facilidad para determinar los ajustes de controlador, si T_i y T_d se eligen de tal modo que $T_i = T_1 + T_2$ y $T_i T_d = T_1 T_2$. En tales condiciones,

$$\frac{C}{R} = \frac{1}{(T_i/K_c K_2)s + 1}$$

Esta función de transferencia representa un retraso de primer orden similar al que se obtuvo para el control PI de un sistema de primer orden [Ec. (22-16)].

Sistemas de más alto orden Se ha demostrado que los controladores PI y PID se pueden utilizar con eficacia en sistemas de control de primero y segundo órdenes. Cuando se tienen más de dos retrasos en el circuito de control, los problemas de análisis y diseño se complican y, para estos casos, se cuenta con otras técnicas. Algunas de éstas se analizan bajo el título "Ajuste del controlador".

La mayor parte de los procesos químicos tienen cierto número de retrasos, y es probable que sea difícil conocer con precisión cuáles son. Del mismo modo, hay muchos procesos químicos que tienen un tiempo muerto inherente que complica el problema de control. A pesar de estas complejidades, para los fines de control automático, la dinámica de la mayor parte de los procesos químicos se describe en forma adecuada por medio de un modelo de primer orden más tiempo muerto.

$$KG(s) = Ke^{-Ls}/(Ts + 1) \qquad (22\text{-}19)$$

o mediante un modelo de segundo orden más tiempo muerto,

$$KG(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \qquad (22\text{-}20)$$

Para procesos que se pueden describir con estos modelos de primero y segundo orden más tiempo muerto, y para los que el tiempo muerto se expresa de manera aproximada por medio de la expansión de serie truncada $e^{-Ls} = 1 - Ls$, se puede demostrar que el controlador PID ideal [Ec. (22-18)] es el mejor posible.

Para procesos de primer orden más tiempo muerto, las constantes de controlador son $K_c = T_1/KL$, $T_i = T$, y $T_d = 0$. Para un proceso de segundo orden más tiempo muerto, son $K_c = (T_1 + T_2)/KL$, $T_i = T_1 + T_2$, y $T_d = T_1 T_2/(T_1 + T_2)$. Experimentalmente se ha demostrado que para $0.1 < T_1/T_2 < 1.0$ y $0.2 < L/T_2 < 1.0$, se puede utilizar el ajuste de velocidad o derivada del controlador $T_d = T_i/4$.

AJUSTES DEL CONTROLADOR

Referencias Generales: Cohen y Coon, "*Theoretical Investigation of Retarded Control,*" *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.*, **75**, 827-834 (1953). Graham y Lathrop, "*The Synthesis of Optimum Transient Response,*" *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, **72(II)**, 273-288 (1953). Haalman, "*Adjusting Controllers for a Deadtime Process,*" *Control Eng.*, **12**(7), 71-73 (1965). Laspe, "*Estimating Controller Actions,*" *Instrum. Control Syst.*, **36**(10), 109-114 (1963). Liptak, "*How to Set Process Controllers,*" *Chem. Eng.*, **71**(25), 129-134 (1964). López, Miller, Smith y Murrill, "*Tuning Controllers with Error-Integral Criteria,*" *Instrum. Technol.*, **14**(11), 57-62 (1967). Miller, López, Smith y Murrill, "*A Comparison of Controller Tuning Techniques,*" *Control Eng.*, **14**(12), 72-75 (1967). Ziegler y Nichols, "*Optimum Settings for Automatic Controllers,*" *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, **64**, 759-768 (1942); *Instrum. Soc. Am. J.*, **11**(6), 73-74 (1964); (7), 75-76 (1964); (8) 63-64 (1964).

En estos párrafos se presenta una introducción de los diferentes métodos que se emplean para diseñar o ajustar controladores proporcionales-integrales-de derivada (PID). Los controladores PID se emplean mucho y son "óptimos" para muchos criterios de diseño. Muchos de los métodos de diseño o ajuste no requieren que la función de transferencia del controlador tenga la forma PID; sin embargo, el hecho de limitar las elecciones posibles al controlador PID hace casi siempre que el trabajo sea más directo.

Las técnicas de ajuste se clasifican en dos categorías: las que se aplican cuando el modelo del proceso se desconoce y las que se utilizan cuando se conoce. Los métodos de la primera categoría requieren pruebas que se deben efectuar en el proceso y que le suministran, en efecto, al usuario la suficiente información del modelo del proceso para proseguir con el ajuste del controlador. Estos métodos se emplean con mucha frecuencia para el ajuste de campo rápido de los circuitos de control. La segunda categoría incluye una variedad de planteamientos analíticos para el ajuste del controlador.

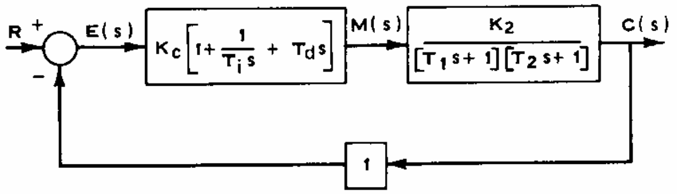


FIG. 22-37 Diagrama de bloques de un control PID idealizado de un proceso sencillo de segundo orden.

Esta exposición se restringe a sistemas de control continuo de tipo lineal. Las técnicas disponibles para ajustar controladores de respuesta no lineal, controladores de datos muestreados y controladores en modalidades especiales, se emplean primordialmente en el control de procesos en combinación con sistemas de control por computadora.

Criterios de rendimiento del controlador En esta parte se hace referencia a varios criterios de diseño o ajuste de controladores. Dichos criterios se derivan básicamente de la técnica de diseño que se está utilizando y por lo común se interpretan de acuerdo con la respuesta del circuito cerrado de un sistema de segundo orden que satisfaga el criterio.

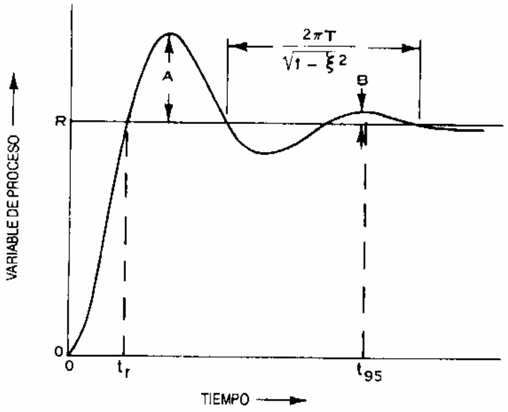


FIG. 22-38 Respuesta de un sistema de segundo orden a una entrada escalonada, en donde $\xi = 0.3$.

La respuesta del sistema de segundo orden a una perturbación se caracteriza, por completo, por la especificación de las constantes de tiempo o el tiempo característico T_c, y la razón o el factor de amortiguamiento ξ en la función de transferencia de la ecuación (22-11). Estos valores se especifican como criterios de diseño para un sistema de control.

Por lo común, las características de la respuesta subamortiguada de un circuito cerrado $\xi < 1$ sirven para describir los criterios de diseño (véase la Fig. 22-38). El índice o razón de amortiguamiento tiene una utilidad particular, puesto que especifica la magnitud de sobremodulación de la respuesta transitoria. Como tal, proporciona un índice conveniente que permite juzgar cualquier criterio de controlador.

Sobremodulación La sobremodulación, A/R de la figura 22-38 expresa el grado al que la respuesta inicial sobrepasa el valor final. Se relaciona con el índice de amortiguamiento ξ mediante la expresión

$$\text{Sobremodulación} = e^{-(\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2})}$$

para el sistema de segundo orden que describe la ecuación (22-11).

Índice de disminución El índice o razón de disminución es un criterio de diseño muy común para el control de un proceso. Con frecuencia se especifica un índice de disminución de un cuarto, $B/A = 1/4$ en la figura 22-38. El índice de disminución para el sistema de segundo orden descrito por la ecuación (22-11) está dado por el índice de disminución = (sobremodulación)^2. La especificación del índice de disminución no define en forma completa la respuesta del sistema, ya que no se restringe el tiempo característico T_c.

Tiempo de aumento El tiempo de aumento para un sistema de segundo orden subamortiguado se puede definir como el lapso que se requiere para efectuar el primer cruce del valor final t_r de la figura 22-38. Además, es una función tanto de T_c como de ξ.

Tiempo de respuesta Se trata del tiempo que requiere el sistema para permanecer dentro de un margen de 5% de su valor final después de una entrada escalonada o de paso t_{95}, como se indica en la figura 22-38.

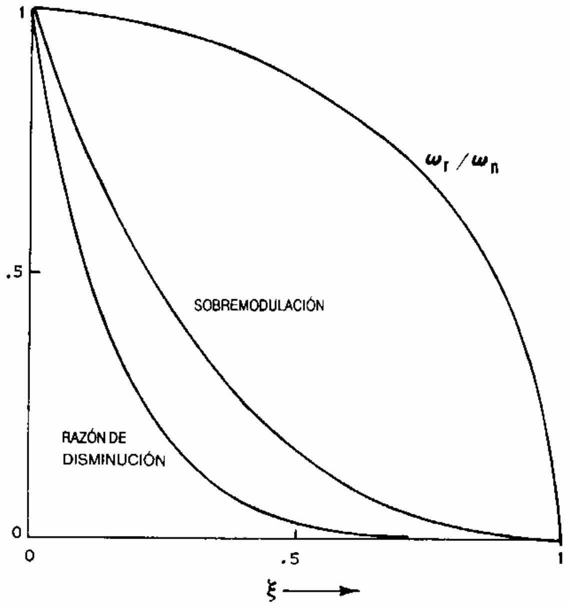


FIG. 22-39 Gráficas de sobremodulación, razón de disminución y ω_r/ω_n en función de la razón de amortiguamiento.

Frecuenci
cidad angular
ecuaciones (2

ω

La razón ω$_r$/ω
miento (véase
Margen d
emplean con
las técnicas
relaciona co
de disminuci
vará que el í
mente, un n
tiguamiento
gen de fase d
circuito abi
variable est
ble de salida,
los 180 grad
no amortigu
dad.
El margen
trolador se p
por tanto, co
mente se esp

rturbación se carac-
stantes de tiempo o
ortiguamiento ξ en
tos valores se espe-
ontrol.
subamortiguada de
criterios de diseño
uamiento tiene una
tud de sobremodu-
iona un índice con-
ontrolador.
la figura 22-38 ex-
a el valor final. Se
ante la expresión

uación (22-11).
minución es un cri-
ceso. Con frecuen-
arto, $B/A = {}^{1}/_{4}$ en la
ma de segundo or-
el índice de dismi-
el índice de dismi-
l sistema, ya que no

a un sistema de se-
mo el lapso que se
final t_r de la figura
e ξ.
iere el sistema para
final después de una
a figura 22-38.

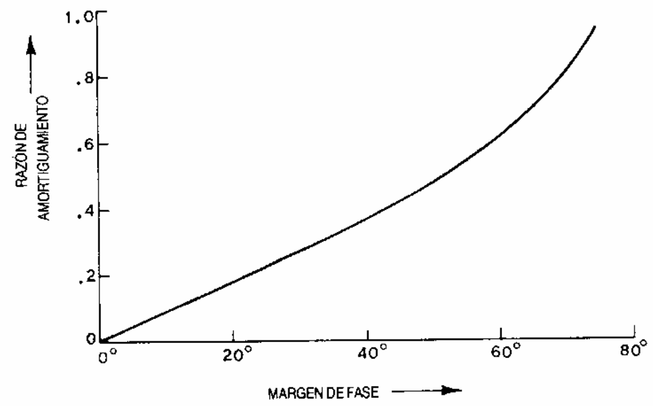


FIG. 22-40 Relación entre la razón de amortiguamiento y el margen de fase para un sistema de segundo orden.

TABLA 22-3 Criterios usuales de la integral de error comparados con otros criterios de rendimiento para sistemas de control de segundo orden subamortiguados

Tipo de criterio		Indice de amortiguamiento	Indice de reducción	Margen de fase
Int. de error al cuadrado (ISE)	$\int e^2\,dt$	0.5	0.03	70 deg.
Int. de error absoluto (IAE)	$\int \lvert e \rvert\,dt$	~0.65	<0.01	>90 deg.
Int. de (tiempo) (error absoluto) (ITAE)	$\int t \lvert e \rvert\,dt$	0.7	<0.01	>90 deg.
Int. de (tiempo) (error al cuadrado) (ITSE)	$\int te^2\,dt$	0.6	0.01	>90 deg.
Error cuadrado medio (MSE)	$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{T}^{T} e^2\,dt$	0.5	0.03	70 deg.
Cuarto de reducción		0.225	0.25	30 deg.

Frecuencia de oscilación La frecuencia angular o pulsación de velocidad angular de oscilación ω_r y la frecuencia natural ω_n se derivan de las ecuaciones (22-11) y (22-12).

$$\omega_r = \sqrt{1 - \xi^2}/T_c \qquad \text{y} \qquad \omega_n = 1/T_c$$

La razón ω_r/ω_n se utiliza entonces para especificar la razón de amortiguamiento (véase la Fig. 22-39).

Margen de fase y ganancia Los márgenes de fase y ganancia se emplean comúnmente como criterios de diseño, cuando se aplican las técnicas de las gráficas de Bode o Nyquist. El margen de fase se relaciona con la razón de amortiguamiento y, por tanto, con el índice de disminución. Si se comparan las figuras 22-39 y 22-40, se observará que el índice de disminución de 0.25, que se emplea comúnmente, un margen de fase de 30 grados, y un índice de amortiguamiento de 0.225, son criterios de diseño equivalentes. El margen de fase de 30 grados significa que, en un sistema de control de circuito abierto con una variable oscilante manipulada, dicha variable está fuera de fase en 150 grados en relación con la variable de salida. Este es un margen de estabilidad de 30 grados, ya que los 180 grados fuera de fase dan origen a una oscilación sostenida no amortiguada, y el sistema se encuentra al borde de la inestabilidad.

El margen de ganancia es el factor por el cual la ganancia del controlador se puede incrementar antes de que ocurra la inestabilidad y, por tanto, constituye una medida de la estabilidad relativa. Generalmente se especifican márgenes de ganancias del orden de 1.7 a 3.

Integrales de error La integral de tiempo de la desviación del proceso en relación con el punto de ajuste se conoce como integral de error. Estas integrales de error se expresan como funciones de la razón de amortiguamiento para un sistema de segundo orden. El objetivo de utilizar un criterio de integral de error asociado al funcionamiento del sistema de control, es reducir al mínimo la integral de error y el tiempo de aumento mediante el ajuste del controlador. Casi todos los criterios integrales subrayan los efectos de la desviación. Las comparaciones hechas en la tabla 22-3 corresponden sólo a sistemas de segundo orden subamortiguados. Los resultados para sistemas de más alto orden pueden ser notablemente distintos.

Métodos de ajuste basados en modelos de procesos conocidos Aunque la mayoría de los controladores se ajustan por medio de técnicas de búsqueda o técnicas basadas en pruebas *in situ* simples, el empleo eficaz de las mismas requiere una comprensión amplia de los métodos basados en modelos de procesos conocidos. Además, las técnicas utilizadas cuando el modelo de proceso se desconoce, pueden no proporcionar una información adecuada para el mejor ajuste del controlador, y quizá sea conveniente un diseño más riguroso. Con frecuencia se dispone de un modelo adecuado para el proceso que se desea controlar, partiendo de las pruebas de dicho proceso, gracias a la retroalimentación de experiencias pasadas, o basadas en el desarrollo de un modelo teórico.

Existen varios métodos para determinar modelos de proceso en forma experimental. En general, tales métodos requieren una entrada de un tipo específico y una medición exacta de la salida del proceso para dicha entrada. Algunos de estos métodos se exponen bajo el título

"procedimientos de ajuste cuando el modelo de proceso se desconoce" y "Análisis del sistema de control".

La determinación de los ajustes de sintonía del controlador requiere, además del modelo de proceso, que se especifiquen los criterios de control. Tales criterios varían y dependen comúnmente de la técnica de diseño elegida.

En general, casi siempre se justifica la suposición de un modelo con retraso de primero o segundo orden más tiempo muerto, para un proceso para el diseño del controlador. Véanse las ecuaciones (22-19) y (22-20). Los términos K, L, T, T_1 y T_2 se determinan experimentalmente o partiendo de un modelo teórico.

Gráficas de Bode para la respuesta de frecuencia Las técnicas para el ajuste de la respuesta de frecuencia del controlador son muy utilizadas, debido a la facilidad relativa del trazo de las gráficas de Bode y a la facilidad con que se maneja el tiempo muerto. Las gráficas de respuesta de frecuencia son, en general, resultado directo de las pruebas de proceso y no requieren forzar el sistema para que se ajuste a un modelo idealizado. También se pueden derivar de la función de transferencia que se utiliza para representar el proceso.

Los datos básicos de respuesta de frecuencia son la variación de ganancia del proceso y el desplazamiento de la fase de salida en relación con la frecuencia, cuando el proceso de circuito abierto se somete a perturbaciones de onda senoidal. Haciendo variar la frecuencia de la perturbación de onda senoidal en una gama amplia, se obtienen los datos de la gráfica de Bode.

Para procesos lineales, la frecuencia de la variación de la salida de proceso será igual que la frecuencia de la perturbación de entrada. Dicho de otra manera, si la variable manipulada se especifica mediante la expresión $m = R_0 \operatorname{sen} \omega t$, entonces, la salida de proceso está dada por $C(s) = KG(s)M(s)$ o $c = R(\omega)$, sen $[\omega t - \phi(\omega)]$. $R(\omega)/R_0$ es la razón de amplitud AR, o ganancia del proceso $\phi(\omega)$, el desplazamiento de fase es el ángulo de fase por el que la salida del proceso se retrasa en relación con la variable

TABLA 22-4 Características de respuesta de frecuencia de procesos típicos, derivadas de funciones de transferencia

ω = frecuencia angular de la entrada de la onda senoidal

Función de transf. $KG(s)$	Razón de amplitud $AR(\omega)$	Cambio de fase $\phi(\omega)$
$\frac{K}{Ts + 1}$	$\frac{K}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}}$	$-\tan^{-1}(\omega T)$
$\frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$	$\frac{K}{\sqrt{(1 + T_1^2\omega^2)(1 + T_2^2\omega^2)}}$	$-\tan^{-1}(\omega T_1) - \tan^{-1}(\omega T_2)$
$\frac{K}{T_c^2s^2 + \xi T_cs + 1}$	$\frac{K}{\sqrt{(1 - \omega^2T_c^2)^2 + (2\xi\omega T_c)^2}}$	$-\tan^{-1}\frac{2\xi\omega T}{1 - \omega^2T_c^2}$
Ke^{-Ls}	K	$-L\omega$

manipulada por medio de las variaciones de la onda senoidal. Las variables $\log AR$ y ϕ son los datos que se requieren para las gráficas de Bode ilustradas en la tabla 22-4 y la figura 22-41. Los detalles adicionales sobre la obtención y la interpretación de los datos de la respuesta de frecuencia se encontrarán bajo el título "Análisis del sistema de control."

Cuando se representa gráficamente en la forma estándar AR en función de ω en papel log-log y ϕ en la función de ω en papel semilogarítmico, las curvas AR y ϕ son directamente aditivas cuando combinan retrasos consecutivos en el modelo de proceso o unidades en el diagrama de bloques. Estas propiedades aditivas se ilustran en la figura 22-42.

Ajuste del controlador basado en las gráficas de Bode El criterio normal de diseño para sistemas de control que emplean el método de la respuesta de frecuencia es la especificación del margen de ganancia

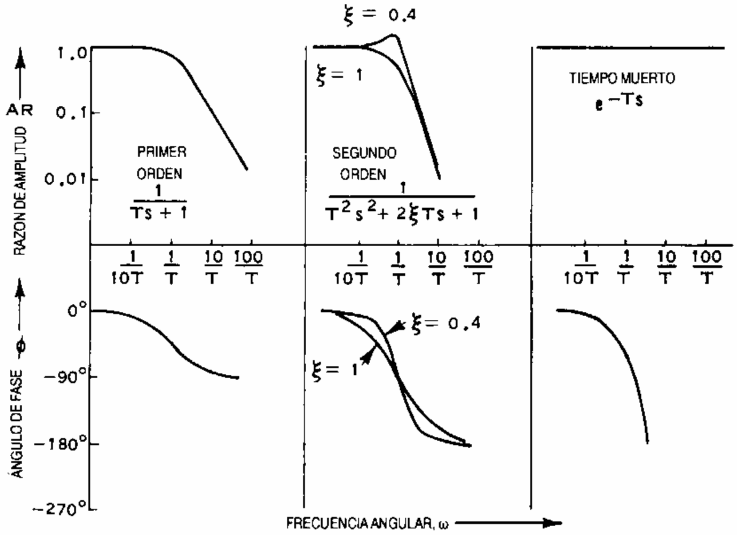


FIG. 22-41 Gráficas de Bode para procesos usuales de primer orden, segundo orden y tiempo muerto.

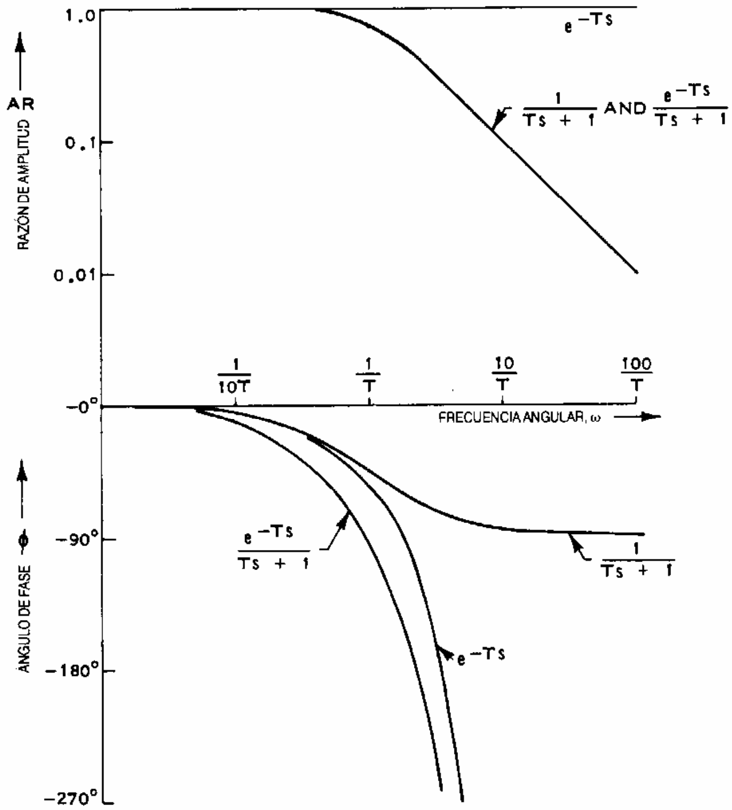


FIG. 22-42 Gráficas de Bode en donde se muestra cómo obtener esta clase de curvas para un proceso compuesto por un retraso de primer orden y un tiempo muerto, sumando las respuestas de los dos procesos componentes.

y el margen de fase del sistema de circuito abierto. Los sistemas de circuito abierto comprenden los elementos del controlador, el proceso y la variable medible.

En la figura 22-43 se representa una elección de ajustes del controlador para regular el proceso de primer orden más tiempo muerto que se ilustra en la figura 22-42, utilizando el controlador caracterizado por la figura 22-44. También se especifican el margen de ganancia y el de fase.

En un sistema de control de circuito cerrado, cuando $AR = 1$ y $\omega = \omega_n$, la frecuencia natural, el sistema sustentará una respuesta oscilatoria a las perturbaciones tipo paso o impulso. En otras palabras, se dice que el sistema está al borde de la inestabilidad. Puesto que $\phi = 180°$, a ω_n, el margen de fase de la estabilidad es $180° - \phi_{AR} = 1$ en donde $\phi_{AR} = 1$ es el ángulo de fase correspondiente a la condición $AR = 1$. El margen de ganancia de estabilidad es la recíproca de AR, cuando $\omega = \omega_n$, es decir, cuando $\phi = 180°$.

Los criterios comunes son 30° para el margen de fase y un factor de 1.7 a 3 para el margen de ganancia. Esos márgenes se basan en la experiencia y la aceptación común de un criterio de disminución de un cuarto en el funcionamiento del controlador.

El ajuste o el diseño del controlador se logra sumando las características de respuesta de frecuencia del mismo a las características del sistema, para obtener los márgenes de fase y ganancia deseados para los sistemas combinados. En la figura 22-44 se ilustran gráficas de Bode para un controlador proporcional de integral y derivada descrito por

$$K_cG_c(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{T_is}\right)(1 + T_ds) \quad \text{con} \quad K_c = 1$$

La selección de T_d y T_i determina la posición de los puntos del ángulo de fase de 45° y los de rompimiento en las curvas de la razón de amplitud. Si se suma la acción de la velocidad se reduce el retraso de fase a grandes frecuencias; en particular, desplaza los 180° o el punto de estabilidad a frecuencias superiores. Cuando se agrega la acción de reajuste, se incrementa el retraso de fase a frecuencias bajas y se tienen pocos efectos en frecuencias elevadas. La acción de la velocidad aumenta la razón de la amplitud a altas frecuencias, reduciendo ligeramente con ello el margen de ganancia. La acción de reajuste eleva la razón de amplitud a frecuencias bajas. La acción proporcional aumenta la razón de amplitud o la ganancia de proceso uniformemente con la frecuencia, sin que se registre un cambio de fase.

El diseño o procedimiento de sintonización o ajuste es:

1. Se coloca el punto del ángulo de fase +50° de la curva de la velocidad sobre la frecuencia $\phi = -180°$ de la curva de proceso. Dicho de otra manera, $1/T_d$ es ligeramente menor que ω para $\phi = 180°$.

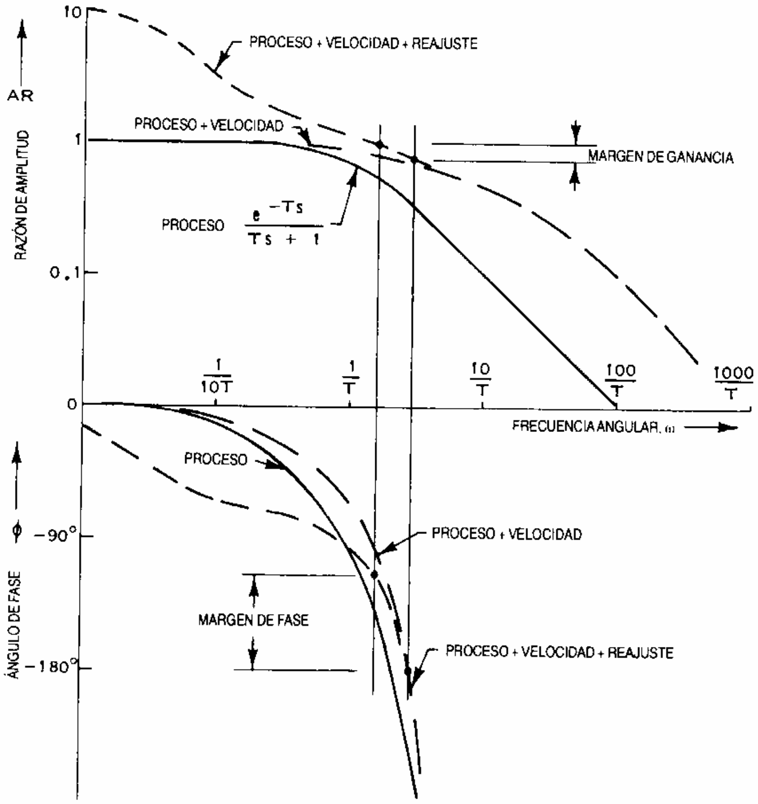


FIG. 22-43 Gráfica de Bode que ilustra las características de proceso y a éstas más un controlador de ganancia proporcional $Kc = 10$. También se indican los márgenes de fase y ganancia del sistema de proceso con controlador sintonizado o ajustado.

2. Se combinan las curvas de amplitud y fase para el T_d del controlador y el proceso.

3. Se coloca un punto de ángulo de fase $-10°$ de la curva de restauración sobre la frecuencia correspondiente a $\phi = -170°$ para las curvas combinadas de velocidad y proceso. Esto especifica $1/T_i$.

4. Se combinan las curvas de amplitud y fase para el controlador a T_i y de proceso combinado más el controlador a T_d.

5. Se agrega la suficiente ganancia proporcional para deslizar la curva de proceso compuesto más reajuste más velocidad en sentido ascendente, a fin de satisfacer el criterio del margen de ganancia.

La curva superior, controlador ajustado más proceso, de la figura 22-43, representa un intento de sintonía o ajuste aplicando el procedimiento anterior. Si se aplican diferentes criterios de margen de ganancia y fase se obtendrán ajustes ligeramente distintos.

Las gráficas de Bode para procesos permiten derivar una estimación de la utilidad de la acción de velocidad. Si

$$2 < \frac{AR \text{ para } \phi = 0°}{AR \text{ para } \phi = -180°} < 10 \quad \text{o} \quad \frac{\omega \text{ para } \phi = -270°}{\omega \text{ para } \phi = -180°} > 5$$

la acción de velocidad será quizá útil. La acción de restauración será probablemente de utilidad en todos los procesos en que $d(AR)/d_w \to 0$ a bajas frecuencias, excepto cuando AR es muy grande.

Diagrama de Nyquist Si se hace la gráfica de la razón de amplitud en función de los datos de cambio de fase de la respuesta de frecuencia utilizando papel de coordenadas polares, se obtendrá lo que se conoce como diagrama de Nyquist. Aunque se dispone de la misma información tanto en el diagrama de Nyquist como en la gráfica de Bode, ésta no se emplea mucho para la sintonización o el ajuste del controlador. Los márgenes de fase y ganancia se representan visualmente con mayor facilidad con el diagrama de Nyquist, pero éstos son más difíciles de construir partiendo de cantidades pequeñas de datos, y los ajustes del controlador son más difíciles de derivar.

En la figura 22-45 se ilustra un diagrama típico de Nyquist. Si $a < 1$ a $\phi = -180°$ (a lo largo del eje real negativo), el proceso es estable; si $a = 1$, es oscilatorio; y si $a > 1$, es inestable. En este caso se indican los márgenes de ganancia y fase.

Lugar geométrico de la raíz El método de lugar geométrico de la raíz para el análisis de sistemas de control es, quizá, la técnica más reveladora de que se dispone para describir el comportamiento de los sistemas de control de retroalimentación. La comprensión del método de análisis basado en el lu-

gar geométri
medio de él,
mental de ot
mente. No c
controlar prc
manejar el ti
Procedin
del proceso
controlador
curva de rea
del periodo f
de curva de r
tener inform
Método d
Ziegler-Nic
ajustar cont
necesarios y
circuito cen
gral y deriv
de control p

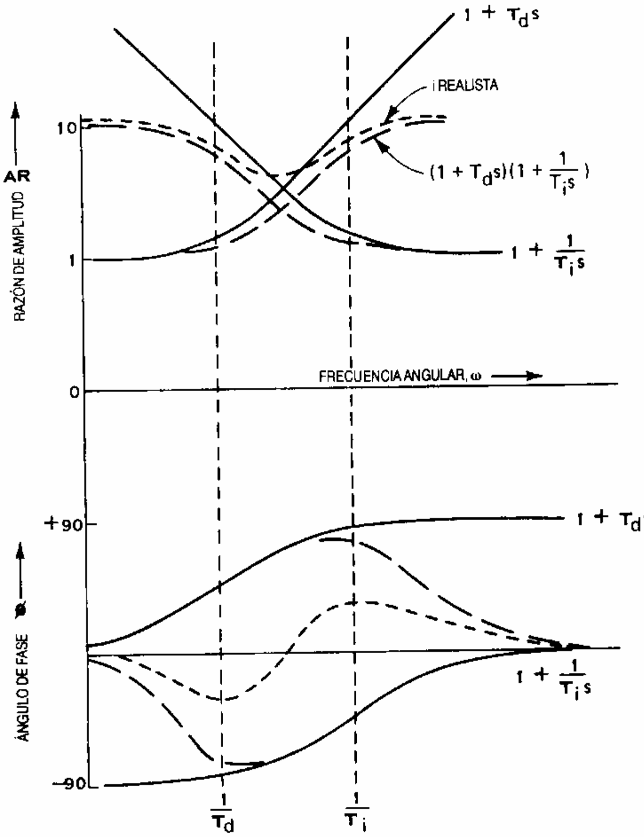


FIG. 22-44 Gráficas de Bode que ilustran las características de frecuencia de controladores ideales no interactuantes, $K_c(1 + T_d s)$ y $K_c(1 + 1/T_i s)$ por medio del tiempo de rapidez de cambio y el tiempo de restauración para $k_c = 1$. Las curvas de trazos largos representan las características de controladores más realistas en donde las ganancias se limitan a 10, cuando $k_c = 1$. Las curvas de trazos cortos representan el controlador PID compuesto.

gar geométrico de la raíz y los resultados que se pueden obtener por medio de él, proporcionan al ingeniero de control una base fundamental de otras técnicas de diseño o ajuste que se utilizan comúnmente. No obstante, esta técnica tiene una utilidad limitada para controlar procesos prácticos, debido a la dificultad que se tiene para manejar el tiempo muerto.

Procedimientos de ajuste cuando se desconoce el modelo del proceso Los métodos de campo más utilizados para ajustar controladores incorporan el método del periodo final, el de la curva de reacción y algunos otros métodos de búsqueda. El método del periodo final utiliza pruebas de circuito cerrado, mientras que el de curva de reacción emplea una prueba de circuito abierto para obtener información sobre el modelo dinámico del proceso.

Método del periodo final (denominado también método de Ziegler-Nichols). El primer paso de este planteamiento para ajustar controladores consiste en obtener los datos de proceso necesarios y los de respuesta dinámica del sistema de control de circuito cerrado. Estos se obtienen ajustando las acciones integral y derivada del controlador, y utilizando sólo la modalidad de control proporcional. La ganancia proporcional se incrementa gradualmente hasta que el sistema de circuito cerrado se ve forzado a desarrollar ciclos continuos en el punto de inestabilidad. Una pequeña alteración, por ejemplo, un cambio en el punto de ajuste, puede hacer necesario que se inicie la oscilación.

La ganancia proporcional en el punto de ciclaje continuo (ganancia final o última) y el periodo de oscilación (periodo final) identifican la respuesta de frecuencia del sistema de circuito abierto en un punto: el ángulo de fase a la frecuencia final (1/periodo final) es −180°, y la ganancia de circuito abierto es igual que la unidad, incluyendo el circuito del controlador y el de retroalimentación. En la tabla 22-5 se sugiere una lista de ajustes de controlador.

Método de la curva de reacción Este sistema de ajuste se basa en la respuesta de circuito abierto del proceso para una entrada de paso o escalonada. Esta curva de respuesta se utiliza para derivar las características dinámicas del proceso. Es más, al hacer la suposición de que el proceso se puede describir por medio de un retraso de primer orden y un tiempo muerto, es posible calcular los puntos de ajuste del controlador.

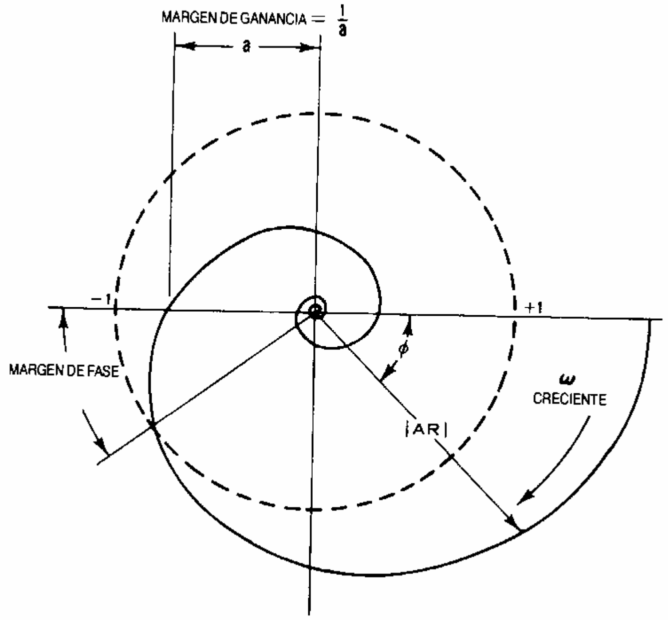


FIG. 22-45 Diagrama de Nyquist para un sistema sobreamortiguado de bajo orden con tiempo muerto.

Suponiendo que un controlador-registrador se conecta al proceso, para obtener los datos de respuesta de proceso necesarios, el controlador se debe colocar en la posición de control manual y aplicar un cambio de paso o escalonado ΔM a la señal del controlador que se aplica a la válvula de control. Se debe llevar un registro del tamaño del cambio de paso y el tiempo de aplicación en la gráfica del registrador. La curva de reacción, que es la respuesta registrada de la variable medida, debe ser similar a la que se ilustra en la figura 22-46.

En relación con la figura 22-46, determínese la máxima velocidad de cambio R y el tiempo muerto L. Se debe calcular la velocidad o el índice de cambio por cambio escalonado unitario en la variable manipulada, es decir, $R_1 = R/\Delta M$. En la tabla 22-6 se señala el ajuste del controlador conveniente expresado en términos de R_1 y L. Estos ajustes de controlador se basan en el criterio de funcionamiento con disminución de un cuarto.

Técnicas de búsqueda Lo antes citado implica que la sintonía del controlador requiere un análisis detallado del circuito de control; en la práctica, muchos controladores se sintonizan aplicando métodos de prueba y error basados en la experiencia que se tiene del proceso. Tales métodos son, casi siempre, seguros si la persona que efectúa los ajustes comprende los aspectos fundamentales del control y el ajuste del controlador, o si el proceso no requiere un alto nivel de eficiencia en el equipo de control instalado.

Cuando los controladores se ajustan aplicando los procedimientos antes delineados, tales ajustes se basan en la suposición de que las perturbaciones penetran en el proceso en un punto específico. Si las características de proceso no se han determinado con precisión, pueden existir varias razones por las cuales las técnicas más formalizadas descritas no den un control satisfactorio. En estos casos, los ajustes finales se deben hacer siguiendo métodos de búsqueda de prueba y error. La calidad de los resultados depende del grado de conocimiento del proceso del que se disponga, así como del conocimiento que se tenga del control.

TABLA 22-5 Ajustes del controlador basados en la ganancia final K_u y en el periodo final T_u

Acción de control	Criterio de rendimiento	Ganancia	Tiempo integral, min.	Tiempo derivado, min.
P	1/4 de reduc.	$0.5\,K_u$		
PI	1/4 de reduc.	$0.45\,K_u$	$0.833\,T_u$	
PID	1/4 de reduc.	$0.6\,K_u$	$0.5\,T_u$	$0.125\,T_u$
PID	Cierta sobremodulación	$0.33\,K_u$	$0.5\,T_u$	$0.33\,T_u$
PID	Ninguna sobremodulación	$0.2\,K_u$	$0.33\,T_u$	$0.5\,T_u$

En sistemas de control computarizado adaptable se utilizan técnicas de búsqueda formales. En estos sistemas la eficiencia de los ajustes del control computarizado se evalúan en forma continua desde un punto de vista cuantitativo, y se llevan a cabo automáticamente pruebas de proceso para determinar cuándo se necesitan nuevos ajustes y de qué índole deberán ser. Las aplicaciones en que son necesarios estos procedimientos, tienen una naturaleza muy especializada y quedan fuera del alcance de este *Manual del Ingeniero Químico*.

Métodos analíticos Las técnicas analíticas para el diseño o ajuste de controladores quedan también fuera del alcance de este *Manual del Ingeniero Químico* y no se emplean muy comúnmente en el control de procesos. Sin embargo, tienen un aspecto instructivo para el ingeniero químico y de control que se interese en problemas de control más complejos.

Con el empleo cada vez más frecuente de computadoras para efectuar análisis de proceso, los métodos analíticos adquieren una mayor

TABLA 22
curva de

Acción de control
P
PI
PID

popularidad
las técnicas a
las ecuacione
lizando por l
terio específi
por técnicas
puesta mínim

Técnicas
dora analógi
diseñar siste
proceso com
ajustes del c
aplicarse en l
ajustes al apl
modelo utili
computadora
"Análisis del

Ajuste de
ajuste de los
caso algo esp
poseen los m
banda muerta
procedimient
dor, o quizá, e

Al reducir l
frecuencia de
pequeña en c
los retrasos de
la frecuencia
control.

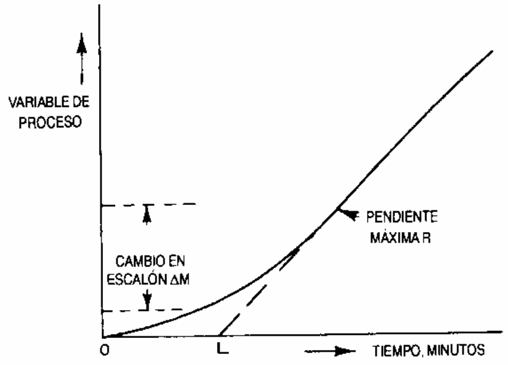


FIG. 22-46 Curva de reacción de una variable usual de proceso cuando la variable manipulada cambia en ΔM.

TABLA 22-6 Ajustes del controlador basados en la curva de reacción de la prueba de proceso

Acción de control	Ganancia	Tiempo integral, min	Tiempo derivado, min
P	$\frac{1}{R_1L}$		
PI	$\frac{0.9}{R_1L}$	3 L	
PID	$\frac{1.2}{R_1L}$ a $\frac{2}{R_1L}$	2.5 L a 2 L	0.5 L a 0.3 L

popularidad día a día, sobre todo en sistemas no lineales. En general, las técnicas analíticas comprenden dos campos: la solución directa de las ecuaciones diferenciales del sistema en el dominio del tiempo, utilizando por lo común variables de estado, y la optimización de un criterio específico de funcionamiento. Los criterios para la optimización por técnicas analíticas comprenden, casi siempre, un tiempo de respuesta mínimo o una función integral de costo en tiempo.

Técnicas de computadora analógica El empleo de la computadora analógica en simulaciones ha creado un método eficaz para diseñar sistemas de control. Cuando se simula tanto el sistema de proceso como el controlador en una computadora analógica, los ajustes del controlador se eligen por cualquier método que pueda aplicarse en la fábrica o planta de que se trate. La seguridad de los ajustes al aplicarse el proceso existente depende de la exactitud del modelo utilizado para la simulación del proceso. La simulación con computadora analógica se estudia más detalladamente bajo el título "Análisis del sistema de control."

Ajuste de sistemas de control de encendido-apagado (on-off) El ajuste de los sistemas de control de encendido-apagado constituye un caso algo especial. En la práctica, muchos de estos controladores no poseen los medios de ajuste adecuados para ajustar la anchura de la banda muerta o el circuito de histéresis como debe ser. Por tanto, el procedimiento consiste en ajustar el proceso tanto como el controlador, o quizá, en vez del controlador.

Al reducir la banda muerta, se reduce la amplitud y se incrementa la frecuencia de oscilación cuando la banda muerta del controlador no es pequeña en comparación con la banda muerta aparente, impuesta por los retrasos del proceso y medición (véase la Fig. 22-26). Al aumentar la frecuencia de oscilación se incrementa el desgaste del equipo de control.

Para reducir la variación, es necesario aumentar la frecuencia de oscilación o ajustar el ciclo de trabajo hacia el 50%. Este último ajuste se debe realizar, casi siempre, ajustando el equipo de proceso. Este tipo de ajuste puede consistir en cambiar la diferencia de encendido-apagado en la variable manipulada, o bien, alterar la fracción de dicha variable regulada por el controlador, desviando el equipo de control con una cantidad constante de la variable manejada.

TEMAS ADICIONALES SOBRE EL CONTROL

REFERENCIAS GENERALES: Cadman, Rothfus y Kermode, "Linear Feedforward Control of a Continuous Flow Stirred Tank Reactor," 59th Annual Am. Inst. Chem. Eng. Meeting, Detroit, 1966. Johnson y Lupfer, "Distillation Column Models," *Chem. Eng. Prog.*, **62**(6), 75-79 (1966). Lupfer y Oglesby, "Applying Dead-Time Compensation for Linear Predictor Process Control, *Instrum. Soc. Am. J.*, **8**(11), 53-57 (1961). Luyben, "Distillation Decoupling," 64th National Am. Inst. Chem. Eng. Meeting, New Orleans, 1969. Tyner y May, *Process Engineering Control*, Ronald, New York, 1968. Webb, "Reducing Process Disturbances with Cascade Control," *Control Eng.*, **8**(8), 73-76 (1961).

Aun cuando la mayor parte de los problemas de control se resuelven aplicando un controlador normal de retroalimentación, se mejora el funcionamiento de muchos sistemas con la aplicación de técnicas especiales. Algunas de ellas se han difundido lo suficiente para incluirlas aquí.

Grados de libertad y control

Grados de libertad y propósito del control En el diseño de un sistema de control se deben emplear métodos que definan el resultado deseado y proporcionen cierto indicio de cuándo se logrará éste. El concepto de los grados de libertad constituye un medio apropiado para lograrlo.

El grado de libertad se determina por medio de cualquier variable independiente que participa en el proceso que, al cambiar, afectará de alguna manera a una o más variables de salida o funcionamiento. El estado o la condición de un proceso se describe de manera completa cuando cada uno de sus grados de libertad se especifica o controla.

El propósito del control automático es reducir los grados de libertad del proceso. Un sistema de control automático es la reducción de grados de libertad del proceso por medio de dispositivos mecánicos, neumáticos, electrónicos o de otra índole. Se dice que un proceso está totalmente bajo control automático cuando los grados de libertad con respecto a las variables de funcionamiento del proceso son idénticos a cero. Dicho de otra ma-

nera, los valores deseados de las variables de funcionamiento son puntos de ajuste para el sistema de control.

Reducción de grados de libertad por medio del control Como ejemplo de la manera como los grados de libertad se reducen por medio del control, véase el sistema de refrigerante que se ilustra en las figuras 22-47 y 22-48. Las variables de funcionamiento de interés son el flujo de masa y la temperatura del refrigerante que entra a la chaqueta. El flujo de masa del refrigerante M_c, es una función del flujo volumétrico y las variables que afectan la densidad del refrigerante. La temperatura de entrada a la chaqueta, T_i, es una función de la mezcla del refrigerante caliente y frío, y las pérdidas de calor entre el punto de mezcla y la entrada a la chaqueta. Estas relaciones se ilustran por medio de las expresiones que se indican a continuación.

$$M_c = f_1(\phi, P_b, P_f, T_f)$$
$$T_i = f_2(\phi, P_b, P_f, T_f, F_1, T_1, F_2, T_2, A)$$

en donde ϕ = posición de la válvula de refrigerante, P_b = presión inversa de la chaqueta, P_f = presión de alimentación del refrigerante, T_f = temperatura de alimentación del refrigerante, F_1 y F_2 = flujos volumétricos a través de los intercambiadores de calentamiento y enfriamiento, T_1 y T_2 = temperaturas del efluente del intercambiador, y A = tem-

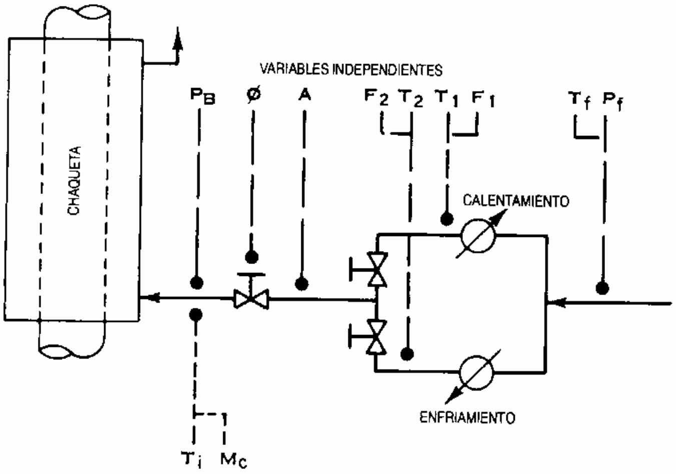


FIG. 22-47 Sistema refrigerante no controlado que ilustra el rendimiento de las variables dependientes y de las variables independientes o grados de libertad.

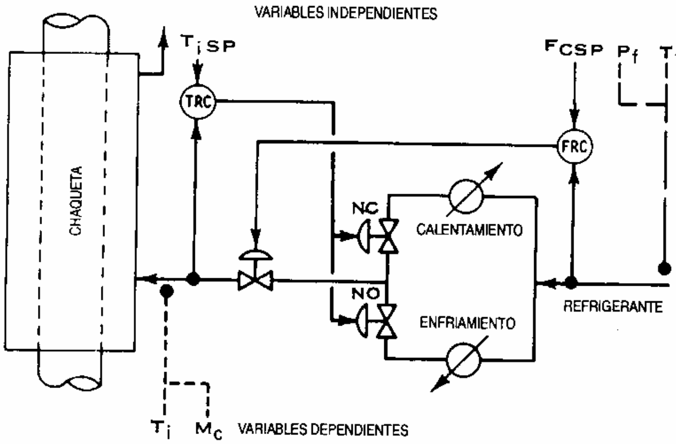


FIG. 22-48 Sistema de refrigerante controlado que muestra las variables independientes o grados de libertad que dan después de agregar los controles.

peratura am
riables inde
El control
la figura 22
expresa aho

en donde F_c
Puesto que
sión:

Quedan t
ellos, F_{cSP},
tad del oper
La adició
más aún los
flujo de refri
medio de d
acción inve

ıdican a continua-

$\Gamma_2, A)$

P_b = presión inver-
l refrigerante, T_f =
F_2 = flujos volumé-
ento y enfriamien-
ıbiador, y A = tem-

peratura ambiente. Así, pues, se tienen nueve grados de libertad o variables independientes.

El control del flujo volumétrico del refrigerante aparece ilustrado en la figura 22-48 por medio del controlador *FRC*. El flujo de masa se expresa ahora como sigue:

$$M_c = f_3(F_{cSP}, P_f, T_f)$$

en donde F_{cSP} = punto de ajuste del gasto volumétrico del refrigerante. Puesto que $F_1 = F_{cSP} - F_2$, el balance de energía da la siguiente expresión:

$$T_t = f_4(F_{cSP}, P_f, T_f, F_2, T_1, T_2, A)$$

Quedan todavía otros siete grados de libertad; sin embargo, uno de ellos, F_{cSP}, está bajo control, es decir, se maneja o especifica a voluntad del operador.

La adición del controlador de temperatura *TRC* (Fig. 22-48) reduce más aún los grados de libertad. Este dispositivo regula la división del flujo de refrigerante a través de los dos intercambiadores de calor, por medio de dos válvulas de alcance, una de acción directa y la otra de acción inversa. Las variables de funcionamiento son ahora

$$M_c = f_5(F_{cSP}, P_f, T_f)$$
$$F_t = f_6(T_{tSP})$$

Esto deja cuatro grados de libertad, de los cuales dos son variables independientes, P_f y T_f, y otros dos se manejan o especifican por decisión del operador, F_{cSP} y T_{tSP}.

Las razones para elegir estas variables de funcionamiento en particular quedarán claramente establecidas en la exposición relacionada con la figura 22-191. Según sea el diseño del resto, del sistema de procesamiento, P_f y T_f pueden ser, o no, variables independendientes. Cualquiera de ellas, o ambas, pueden ser una condición fija de operación. Se debe tener mucho cuidado al determinar qué variable particular será una condición fija de operación. Existen muchos ejemplos de sistemas de control que operan a un nivel poco satisfactorio, debido a que la llamada condición fija de operación no lo es en realidad.

Control de cascada Uno de los métodos más utilizados para reducir al mínimo perturbaciones que entran en un proceso lento es el control en cascada o circuitos múltiples. El control en cascada puede acelerar también la respuesta del sistema de control, reduciendo la constante de tiempo de la función de transferencia de proceso que relaciona la variable manipulada con la salida del mismo. En la figura 22-49 se ilustra un diagrama de bloques correspondiente a un sistema de control en cascada. En lugar de ajustar el elemento de control final, por ejemplo, una válvula reguladora, la salida del controlador primario es el punto de ajuste del circuito de control secundario.

El circuito de control secundario que abarca sólo una porción del proceso total es un sistema de orden menor, de modo que el controlador se puede ajustar para dar una respuesta más rápida. Estúdiese la figura 22-50. Aquí se ha conectado en cascada un controlador de flujo con el controlador de temperatura de la figura 22-2. Las constantes de tiempo del circuito secundario son mucho más pequeñas que para el proceso

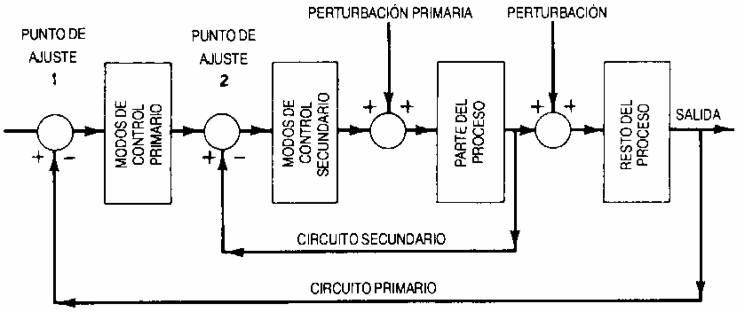


FIG. 22-49 Diagrama de bloques de controladores de retroalimentación conectados en cascada.

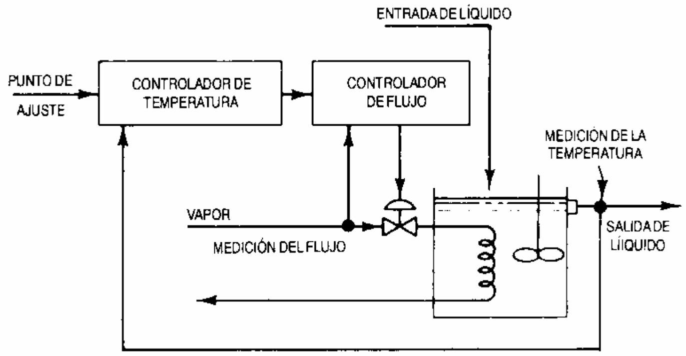


FIG. 22-50 Sistema de control en cascada en el cual las perturbaciones originadas en el abastecimiento de vapor quedan imposibilitadas para penetrar en el proceso del intercambiador de calor.

total, de manera que el buen ajuste del controlador secundario elimina de un modo eficaz o reduce al mínimo, por lo menos, las perturbaciones de flujo que entran al proceso a través del abastecimiento de vapor.

La eliminación de una fuente de perturbaciones reduce los grados de libertad del proceso y hace disminuir el orden y las constantes de tiempo del mismo. Estas reducciones en los grados de libertad, el orden y las constantes de tiempo, aumentan la velocidad de la respuesta que se puede obtener en el circuito de control primario. También reducen el tamaño de las variaciones en la variable controlada, más allá de lo que sería posible incrementando la velocidad de respuesta del sistema de control primario.

Por lo común, hay tres características principales presentes en el control en cascada para que sea eficaz. La constante de tiempo de circuito cerrado del circuito secundario debe ser menor que un tercio de la constante de tiempo del circuito primario, el circuito secundario debe incluir una fuente de perturbación de proceso importante, y la variable de proceso que se regula debe ser capaz de desplazar a la variable controlada primaria a su valor deseado.

Un control en cascada de naturaleza un poco diferente es la técnica que consiste en utilizar sistemas de control por computadora, para reducir los ajustes manuales de funcionamiento del proceso los que representan parámetros de funcionamiento o calidad de ajuste del proceso.

Control de alimentación directa El control de alimentación directa (denominado a veces control predictivo o de anticipación) comprende básicamente un proceso de entradas múltiples, en el cual éstas se pueden medir. Según la figura 22-3, el control de alimentación directa utiliza las mediciones de entrada y las relaciones entre las entradas y las salidas, para ajustar el proceso con el fin de minimizar o eliminar los efectos de las perturbaciones de entrada en la salida del mismo.

En la figura 22-51, el modelo de proceso en las modalidades de control de alimentación directa posee características dinámicas muy diferentes de las que representan los bloques del proceso. La dinámica que encierra el mayor interés es la que se relaciona con las mediciones de alimentación y la variable regulada. Con frecuencia, esta dinámica se puede considerar de índole instantánea y las modalidades de control son muy simples, reduciéndose sólo a la modalidad proporcional.

En el diagrama de bloques generalizado de la figura 22-52, la relación entre la variable de salida $C(s)$ y la variable de perturbación $U(s)$, está dada por

$$[C(s)/U(s)] = K_2G_2(s)[K_3G_3(s) + K_cG_c(s)K_1G_1(s)] \qquad (22\text{-}21)$$

El propósito del control de alimentación directa consiste en hacer que la salida del proceso dependa sólo de $R(s)$, que es el punto de ajuste o punto fijo. En otras palabras,

$$[C(s)/R(s)] = K_1G_1(s)K_2G_2(s)$$

La ecuación (22-21) indica que la perturbación no tiene ningún efecto si

$$K_cG_c(s)K_1G_1(s) + K_3G_3(s) = 0$$

o si el controlador está descrito por

$$K_cG_c(s) = [K_3G_3(s)/K_1G_1(s)] \qquad (22\text{-}22)$$

Para ilustrar esto con un ejemplo sencillo, si en el proceso $K_3G_3(s) = K_3$ y $K_1G_1(s) = K_1/(T_1s + 1)$, entonces, según la ecuación (22-22), el controlador de alimentación directa estará descrito por

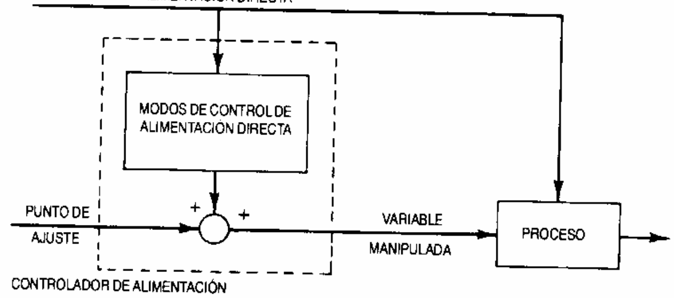


FIG. 22-51 Diagrama de bloques de un sistema de control con alimentación directa.

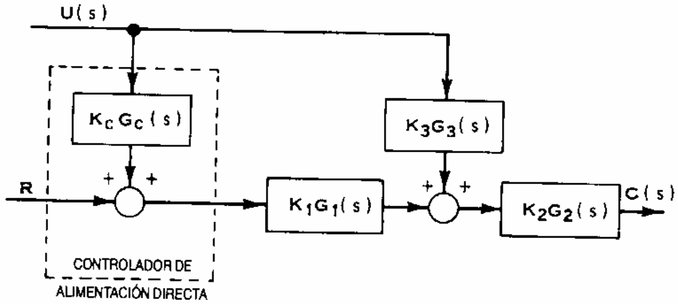


FIG. 22-52 Diagrama de bloques generalizado de un sistema de control con alimentación directa.

que pertenec
locidad.
Sistemas
se mencionó
directa satisf
que el de ali
ción con él. I
reduce la pre
ceso que se n
Una de las
binados de ali
ofrecen tales
22-54), las sa
control que s
de salida afe

ɔdalidades de con-
ıámicas muy dife-
ı. La dinámica que
las mediciones de
ı, esta dinámica se
lidades de control
proporcional.
ura 22-52, la rela-
perturbación $U(s)$,

$\iota G_1(s)]$ (22-21)

ısiste en hacer que
l punto de ajuste o

ıe ningún efecto si

(22-22)

ıroceso $K_3G_3(s)$ =
uación (22-22), el
por

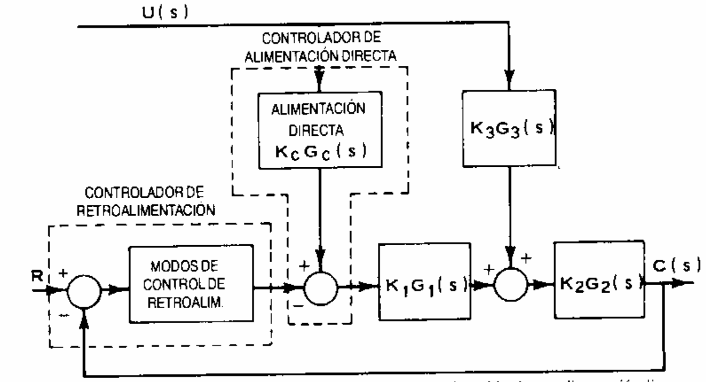


FIG. 22-53 Diagrama de bloques generalizado de un sistema de control combinado con alimentación directa y retroalimentación.

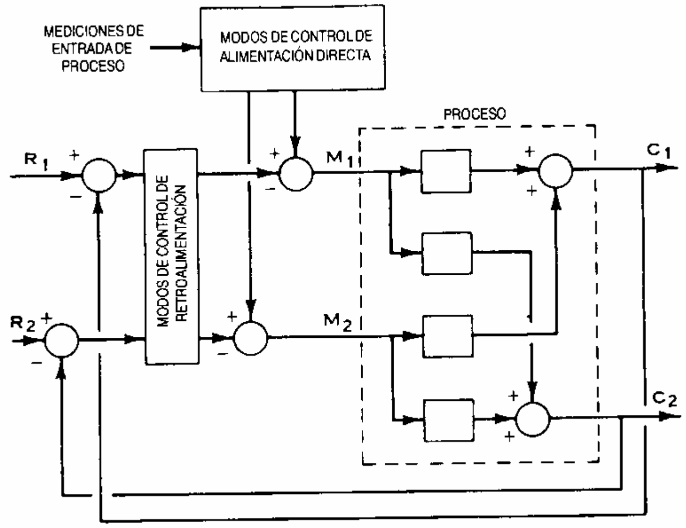


FIG. 22-54 Diagrama de bloques de un sistema de control combinado con alimentación directa y retroalimentación.

$$K_cG_c(s) = -(K_3/K_1)(T_1s + 1)$$

que pertenece a la configuración de controlador proporcional más velocidad.

Sistemas combinados de alimentación directa e inversa Como se mencionó en relación con la figura 22-4, el control de alimentación directa satisface raramente todas las necesidades de control, de modo que el de alimentación inversa se emplea comúnmente en combinación con él. Este tipo de configuración, ilustrado en la figura 22-53, reduce la precisión y la cantidad de conocimientos detallados del proceso que se necesitan para especificar $K_cG_c(s)$.

Una de las aplicaciones muy especializada para los controladores combinados de alimentación directa e inversa ilustra parte del potencial que ofrecen tales sistemas. En un proceso de dos entradas y dos salidas (Fig. 22-54), las salidas pueden desacoplarse de tal manera que la acción de control que se toma como resultado de una medición en una variable de salida afecte sólo a esa variable. La determinación del carácter de los controladores de alimentación directa y retroalimentación es, en general, un trabajo de álgebra de matrices, y casi siempre se requiere una computadora para el funcionamiento de los controladores. Véase la subsección "Sistema de fraccionamiento."

Compensación del tiempo muerto Cuando se emplea un controlador normal de retroalimentación en un proceso que tiene un tiempo muerto apreciable, el sistema de control se caracteriza por tener una respuesta lenta. Los ajustes del controlador se caracterizan por ganancias proporcionales pequeñas y tiempos de restauración reducidos. Una técnica eficaz para acelerar la respuesta del controlador aparece ilustrada en la figura 22-55. El objetivo de la compensación es que se pueda ajustar el controlador como si no existiera ese tiempo muerto. Los modelos del proceso, de bajo orden y tiempo muerto, pueden ser difíciles de ponerse en práctica si el sistema de control no se computariza.

La variable manipulada actúa en la porción $K_1G_1(s)$ del modelo y proporciona una señal de retraso de bajo orden, que se suma a la señal de salida de retroalimentación del proceso, y se compara inmediata-

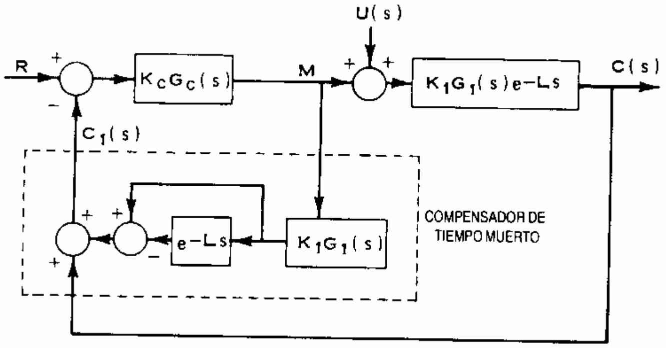


FIG. 22-55 Diagrama de bloques de una compensación de tiempo muerto aplicada a un proceso que comprende retrasos y tiempo muerto.

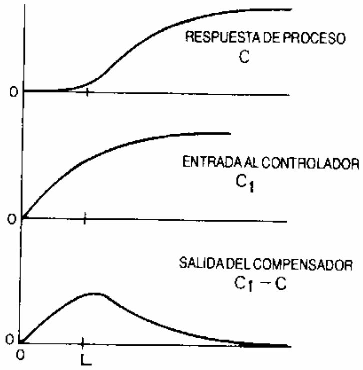


FIG. 22-56 Comparación de la respuesta de proceso con la entrada al controlador y una salida de tiempo muerto del compensador, para un cambio escalonado en el punto de ajuste.

mente con el punto fijo o de referencia. Esta señal de control de circuito cerrado no tiene tiempo muerto. Cuando e^{-Ls} actúa sobre la salida $K_1G_1(s)$ del modelo, la señal sumada a la señal de salida de reatroalimentación del proceso comienza a dirigirse hacia cero, en el lapso en que ha transcurrido el tiempo muerto. La señal del compensador se hace cero cuando la señal del proceso de retroalimentación, C, llega a su respuesta plena y C_1 se hace igual que C, como se observa en la figura 22-56. Dicho de otra manera,

$$C_1(s) = \overbrace{K_1G_1(s)e^{-Ls}M(s)}^{\text{Proceso}} + \overbrace{K_1G_1(s)(1 - e^{-Ls})M(s)}^{\text{Modelo}}$$
$$= K_1G_1(s)M(s)$$

Control de encendido-apagado, sin atenuación (on-off) Cuando se considera un control de proceso en el cual las perturbaciones se reducen al mínimo, el control de encendido-apagado (*on-off*) constituye una acción de control muy violenta. Por otro lado, según la mayor parte de los criterios de diseño de tiempo óptimo, el controlador de encendido-apagado es óptimo, a condición de que no existan restricciones de proceso que prohíban acciones de control repentinas. Debido a estas y otras consideraciones, se ha despertado un nuevo interés en las aplicaciones del controlador de encendido-apagado para regular procesos.

La función de conmutación óptima para un sistema de control de orden n incluye n - 1 derivaciones de E. Dicho de otra manera,

$$M = M_0 \text{ señal } F\left(E, \frac{dE}{dt}, \ldots, \frac{d^{n-1}E}{dt^{n-1}}\right)$$

En la práctica, la aproximación $F(E,dE/dt) = E + T(dE/dt)$ da buenos resultados. Esto equivale a suponer una representación de segundo orden del proceso, y establecer una aproximación lineal de la función de conmutación (interruptor).

El análisis de los sistemas de control de encendido-apagado no se practica con mucha frecuencia. La mayor parte del trabajo se realiza mejor en el dominio del tiempo, en donde el plano de fase, que es la gráfica de dE/dt en función de E, sirve como ayuda visual para interpretar el funcionamiento. La simulación analógica simplifica enormemente este tipo de análisis.

Sistemas de control no lineales En los sistemas de control de procesos se encuentran muchos elementos de índole no lineal. El proceso químico es, por lo común, no lineal, aunque la mayor parte de los procedimientos de análisis de sistemas de control presuponen la linealidad. El análisis de un sistema no lineal es mucho más difícil que el análisis lineal. La técnica de linealización de perturbación pequeña ha sido un método que ha dado buenos resultados.

El empleo de computadoras de alta velocidad ha hecho posible llevar a cabo análisis más detallados de sistemas de control no lineales. En particular, el análisis en el dominio del tiempo de tales sistemas se ha simplificado bastante por medio de las técnicas de simulación. El controlador de encendido-apagado antes descrito es un ejemplo de los dispositivos no lineales. Los controladores de computadora han hecho posible una gran variedad de acciones no lineales que mejoran el rendimiento de los procesos.

El análisis de sistemas no lineales se puede resolver por cualquiera de varios métodos: la solución analítica directa en el dominio del tiempo (incluyendo soluciones numéricas), la linealización de términos no lineales sobre una región de operación pequeña, las técnicas gráficas como las gráficas de planos de fase, y la simulación.

MEDICIONES DE PROCESO

REFERENCIAS GENERALES: Benedict, *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, Wiley, New York, 1969. Considine, *Process Instruments and Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1957. Considine y Ross, *Handbook of Applied Instrumentation*, McGraw-Hill, New York, 1964.

TABLA 22
de Tempe

Intervalo de temp. °C.
−259.34 a cero
Cero a 630.74
630.74 a 1064.42
1064.43 y más

*La tempe
el termómetro

in restricciones de
s. Debido a estas y
terés en las aplica-
regular procesos.
ema de control de
ra manera.

'(dE/dt) da buenos
ión de segundo or-
al de la función de

ido-apagado no se
l trabajo se realiza
de fase, que es la
visual para inter-
implifica enorme-

de control de pro-
lineal. El proceso
or parte de los pro-
suponen la lineali-
más difícil que el
oación pequeña ha

hecho posible lle-
ontrol no lineales.
le tales sistemas se
de simulación. El
un ejemplo de los
utadora han hecho
ue mejoran el ren-

ver por cualquiera
dominio del tiem-
ión de términos no
s técnicas gráficas

;, 1957. Considine y
ill, New York, 1964.

TABLA 22-7 Bases de la Escala Práctica Internacional de Temperatura de 1968

Intervalo de temp. °C	Ecuación de interpolación	Instrumento estándar (patrón)
−259.34 a cero	Una función de referencia de vigésimo orden en donde el intervalo se divide en cuatro partes para la interpolación	Termómetro de resistencia de platino
Cero a 630.74	$R_t + R_0[1 + A(t - \Delta t) - B(t - \Delta t)^2]$ En donde Δt es una función de cuarto orden, R_t = valor de la resistencia del termómetro a la temperatura t, R_0 = resistencia a 0°C, y A y B son constantes	
630.74 a 1064.42	$E = a + bt + ct^2$ en donde E = fem de termopar estándar y a, b, y c son constantes*	Termopar de platino y platino-rodio (10%)
1064.43 y más	$\frac{J_T}{J_{Au}} = \frac{e^{C_2/\lambda T_{Au}} - 1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$ en donde J_T y J_{Au} son las energías radiantes por unidad de intervalo de longitud de onda a la longitud de onda λ emitida por unidad de tiempo, por un área unitaria de cuerpo negro a la temperatura T, K, y al punto de oro T_{Au}, respectivamente; C_2 = 1.4388 cm grados	Pirómetro óptico

*La temperatura del punto del antimonio (630.74 K) se debe determinar con el termómetro de resistencia estándar (patrón).

ISA Transducer Compendium, 2d ed., Plenum, New York, 1969. Liptak, *Instrument Engineers Handbook*, Chilton, Philadelphia. 1969. "Process Instrument Elements," *Chem. Eng.*, **76**(11), 137-164 (junio 2, 1969).

MEDICIONES DE TEMPERATURA

REFERENCIAS GENERALES: Benedict, "International Practical Temperature Scale of 1968," *Leeds Northrup Tech. J.*, no. 6, 1-12 (spring, 1969); *Instrum. Control Syst.*, **42**, 85-89 (octubre, 1969).

Escala internacional de temperatura La Escala Internacional Práctica de Temperatura se estableció con el fin de contar con una base congruente para efectuar mediciones precisas y convenientes de la temperatura. Esta escala cubre el intervalo desde el punto triple del hidrógeno hasta los cuerpos incandescentes y las llamas. La escala se basa en temperaturas de equilibrio reproducibles o puntos fijos a los cuales se han asignado valores numéricos, y también en fórmulas de interpolación específicas que relacionan temperaturas entre tales puntos o más allá de ellos, para indicar los instrumentos estándares de medición de temperatura. En la tabla 22-7 se indica la naturaleza de estas fórmulas y los instrumentos estándares.

Termopares Las mediciones de temperatura que utilizan termopares se basan en el descubrimiento hecho por Seebeck en 1821 de que una corriente fluye en un circuito continuo de dos alambres metálicos diferentes, si las dos conexiones o uniones, se encuentran a temperaturas distintas. El termopar se representa diagramáticamente como se indica en la figura 22-57, A y B son los dos metales, y T_1 y T_2 son las temperaturas de las uniones. Si T_1 es la unión más fría y la corriente termoeléctrica i fluye en la dirección señalada en la figura 22-57a, el

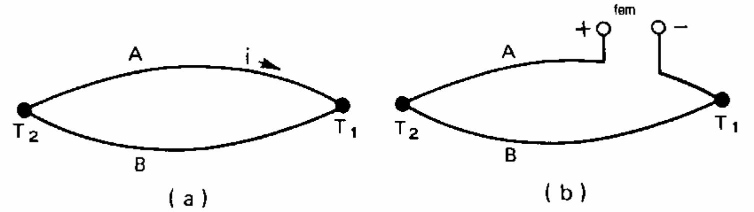


FIG. 22-57 Circuito simple de un termopar.

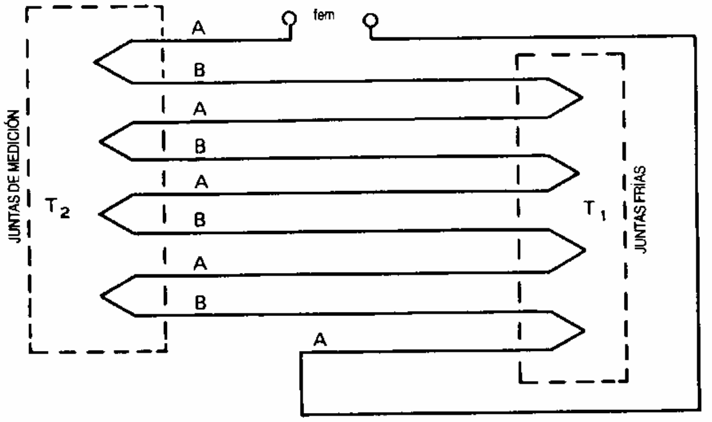


FIG. 22-58 Utilización de varios termopares para incrementar la señal de fem para efectuar mediciones de pequeños diferenciales de temperatura o para obtener la temperatura promedio.

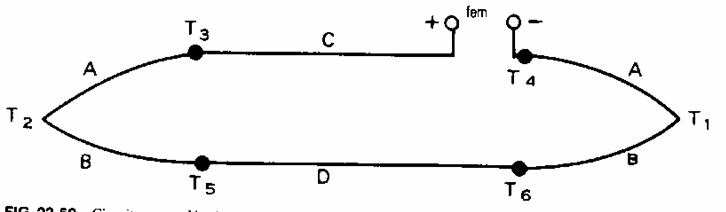


FIG. 22-59 Circuito termoeléctrico con los conductores adicionales C y D y las temperaturas de juntas T_3, T_4, T_5 y T_6, agregados al circuito simple de la figura 22-57.

metal A se designa, por costumbre, como el punto termoeléctricamente positivo en relación con el metal B.

En circuitos eléctricos, la corriente depende de la fuerza electromotriz (fem) desarrollada y la resistencia del circuito. Para lograr mediciones de temperatura exactas, el instrumento de medición se construye de tal modo que se mida una fem sin corriente para eliminar los efectos de resistencia del circuito.

Como se señala en la figura 22-57*b*, la fem térmica es una medida de la diferencia de temperatura entre T_2 y T_1. En los sistemas de control, la unión o conexión de referencia (unión fría) se localiza casi siempre en el dispositivo de medición de la fem. La unión de referencia se puede mantener a temperatura constante, por ejemplo, la que se tiene en un baño de hielo o en un horno con termostato, o bien, se puede sostener a la temperatura ambiente, pero con una compensación eléctrica de tal manera que parezca conservarse a una temperatura constante.

También se pueden utilizar combinaciones en serie de varios termopares idénticos para proporcionar una señal de medición de temperatura mayor o para promediar la temperatura en varios puntos. Como se ilustra en la figura 22-58, las uniones frías deben encontrarse a la misma temperatura, de lo contrario también será necesario promediarlas.

Metales y temperaturas intermedios En la figura 22-57*a*, las variaciones de temperatura a lo largo de A o B no afectan la fem térmica generada por la diferencia de temperaturas T_2 - T_1, a condición de que tales variaciones no modifiquen las temperaturas de unión, y también de que los alambres A y B sean homogéneos en toda su extensión.

Cuando la unión de medición se localiza a una distancia prolongada en relación con la unión de referencia y el dispositivo de medición, puede resultar más económico utilizar ***alambres de extensión*** especiales, como lo indican C y D en la figura 22-59. La fem se mantiene sin variaciones cuando $T_3 = T_4 = T_5 = T_6$, incluso a pesar de que C y D son metales distintos de A y B. No obstante, en muchas aplicaciones de proceso, estas temperaturas no son todas iguales. Dado que T_3 - T_4 y T_5 - T_6, son casi siempre menores que T_2 - T_1, la combinación de alambres de extensión C y D sólo necesitan tener las mismas propiedades termoeléctricas que la combinación A y B en el intervalo de temperaturas más reducido asociado con T_3, T_4, T_5 y T_6, para asegurar la precisión de la medición.

Termómetros de resistencia Los termómetros de resistencia dependen de las características inherentes de los metales para cambiar su resistencia eléctrica cuando se someten a un cambio de temperatura. Aunque los termómetros de resistencia industriales se construyen casi siempre de platino, cobre o níquel, se han venido utilizando cada vez con mayor frecuencia materiales semiconductores, como las resistencias térmicas o termorresistores.

Básicamente, el termómetro de resistencia es un instrumento para medir resistencias eléctricas que se calibra en unidades de temperatura, en lugar de hacerlo en unidades de resistencia. Hay varias formas comunes de circuitos de puente que se emplean en la termometría de resistencia de índole industrial, y el más común de todos es el puente de Wheatstone. Estos puentes se pueden excitar con un desequilibrio de corriente continua o alterna, y se indican por medio de instrumentos

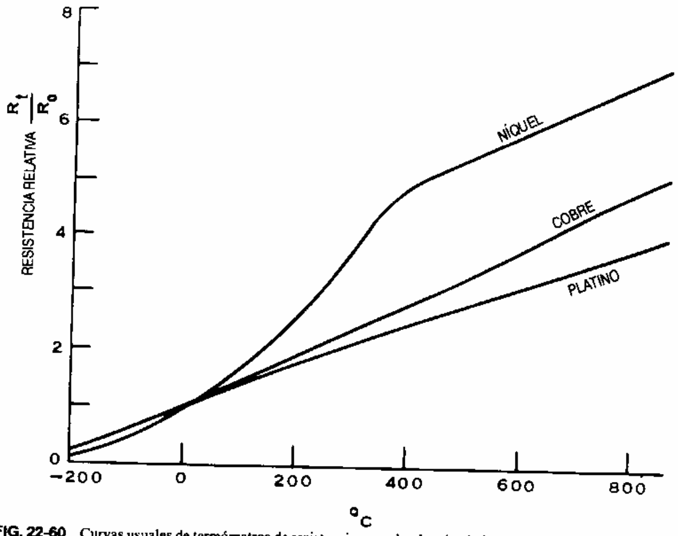


FIG. 22-60 Curvas usuales de termómetros de resistencia para alambre de platino, cobre y níquel, en donde R_t = resistencia a la temperatura t y R_0 = resistencia a 0°C.

del tipo de ba
mentos indica
Coeficient
cia eléctrica d
tura se conoc
coeficiente se
por grado de t
los metales, c
metales puros
porciones de s
En la figur
función de la
tablas detallad
nistran la Nati
tros de resiste
Termómet
se diseñan par
distancia del p
elemento sens
un líquido qu
temperatura. E
tubo de Bourd
El tubo de Bou
miento relació
del bulbo. Lo
completament
a cambios de p
líquido volátil
ta a las alterac

ancia prolongada en
de medición, puede
ón especiales, como
iene sin variaciones
ion metales distintos
oceso, estas tempe-
T_6, son casi siempre
extensión C y D sólo
cas que la combina-
ido asociado con T_3,
l.
s de resistencia de-
lles para cambiar su
bio de temperatura.
s se construyen casi
utilizando cada vez
, como las resisten-

n instrumento para
lades de temperatu-
. Hay varias formas
n la termometría de
e todos es el puente
on un desequilibrio
dio de instrumentos

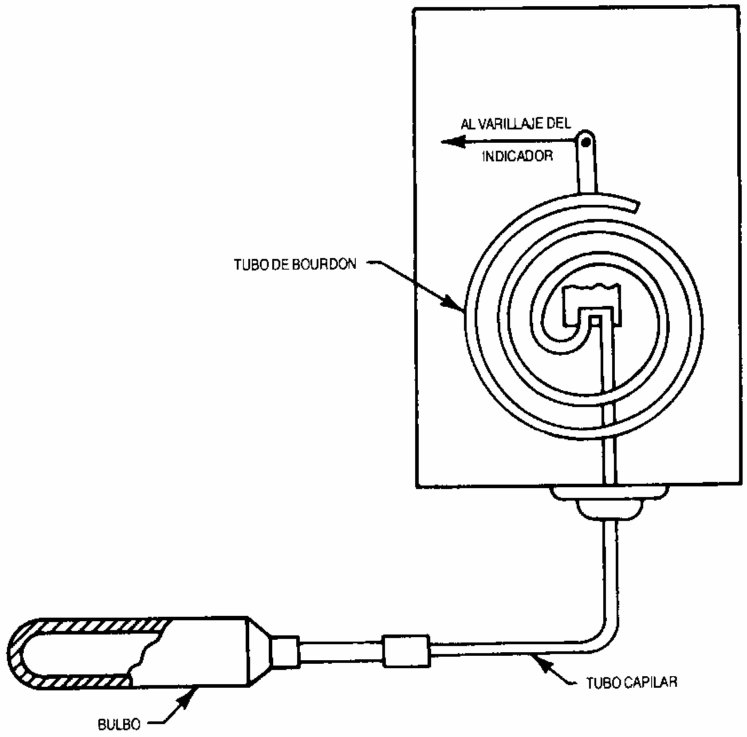


FIG. 22-61 Termómetro de sistema lleno.

del tipo de balance nulo o de deflexión; véase la subsección "Instrumentos indicadores y de registro."

Coeficiente de resistencia por temperatura El cambio de resistencia eléctrica de un material en respuesta a una variación de la temperatura se conoce como "coeficiente de resistencia por temperatura." El coeficiente se expresa como un cambio de resistencia en ohms por ohm por grado de temperatura a una temperatura específica. Para casi todos los metales, el coeficiente de temperatura es positivo; para muchos metales puros, el coeficiente es esencialmente constante en grandes porciones de su gama útil.

En la figura 22-60 se presentan las curvas de resistencia típica en función de la temperatura para el platino, el cobre y el níquel. Hay tablas detalladas de resistencia en función de la temperatura que suministran la National Bureau of Standards y los fabricantes de termómetros de resistencia.

Termómetros de sistema lleno Los termómetros de sistema lleno se diseñan para proporcionar una indicación de la temperatura a cierta distancia del punto de medición, como se ilustra en la figura 22-61. El elemento sensible o de medición (bulbo o ampolla) contiene un gas o un líquido que cambia de volumen, presión o presión de vapor por la temperatura. Este cambio se comunica por medio de un tubo capilar al tubo de Bourdon u otro dispositivo sensible a la presión o el volumen. El tubo de Bourdon responde de tal manera que proporciona un movimiento relacionado en una forma muy específica con la temperatura del bulbo. Los sistemas que responden a cambios de volumen están completamente llenos con un líquido, en tanto que los que responden a cambios de presión están llenos de gas, o bien, parcialmente con un líquido volátil. Los cambios en la presión de gas o de vapor en respuesta a las alteraciones de las temperaturas de bulbo, se transmiten por el capilar hasta el Bourdon. Estos últimos bulbos se construyen, a veces, de tal manera que el capilar se llena con un líquido no volátil.

El movimiento de Bourdon se utiliza directamente o se amplifica por medio de un enlace mecánico o sistema de engranaje, para impulsar la aguja de un indicador de temperatura o para mover la pluma de un registrador de temperaturas. Los bulbos llenos de fluido comunican la suficiente potencia para mover mecanismos del controlador e incluso para activar en forma directa válvulas de control. Estos dispositivos se caracterizan por una capacidad térmica sustancial que, en ocasiones, genera una respuesta lenta, sobre todo cuando están encerrados en un pozo térmico para efectuar mediciones de procesos.

Aplicación Los termómetros llenos se utilizan con mucha frecuencia en procesos industriales por muchas razones. La sencillez de estos dispositivos permite lograr construcciones resistentes, minimizando la posibilidad de fallas por daños con una cantidad casi siempre mínima de mantenimiento. En caso de fallas en el sistema, toda la unidad debe sustituirse o repararse. Su sencillez puede permitir incluso un diseño general poco costoso del equipo de control.

Tal como se utilizan normalmente en las industrias de proceso, la sensibilidad y el procentaje de exactitud de intervalo de estos termómetros son, casi siempre, semejantes a otros instrumentos de calidad de tipo industrial para la determinación de temperaturas. La sensibilidad y la precisión absoluta no son equiparables a las de algunos instrumentos eléctricos de corto intervalo que se utilizan en conexión con bulbos de termómetros de resistencia. Asimismo, la temperatura máxima es más limitada que en ciertos dispositivos eléctricos de medición.

El capilar permite una separación considerable entre el punto de medición y el punto en que se indica la temperatura, pero comúnmente se

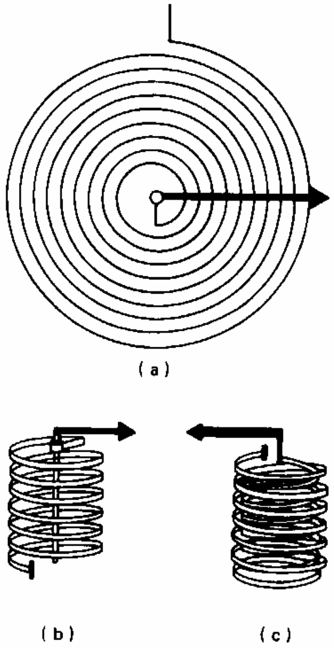


FIG. 22-62 Principales tipos de elementos utilizados en termómetros bimetálicos. *a*) Espiral plana. *b*) Hélice sencilla. *c*) Hélice múltiple.

limita a 76 m (250 ft). Con frecuencia, es más económico utilizar transmisores para llevar la señal a distancias superiores a 30 m (100 ft).

Estos dispositivos vienen en una sola unidad y no requieren fuentes de alimentación auxiliares, como aire comprimido o electricidad, a menos que la intención sea tener un sistema de transmisión de señal.

Termómetros bimetálicos El bimetal termostático se define como un material compuesto que consta de tira o flejes de dos o más metales unidos entre sí. Debido a los diferentes índices de expansión de sus componentes, esta composición tiende a cambiar de curvatura cuando se somete a una variación de temperatura.

Cuando se mantiene fijo un extremo de una tira recta, el otro sufre una deflexión proporcional al cambio de temperatura y al cuadrado de la longitud, y en sentido inverso al espesor, a lo largo de la porción lineal de la curva característica de deflexión. Si una tira bimetálica se enrolla en forma helicoidal o como espiral y se fija uno de sus extremos, el otro extremo girará al aplicársele calor. Para un termómetro con divisiones de escala uniformes, el elemento bimetálico se debe diseñar de tal manera que tenga una deflexión lineal a lo largo del intervalo de temperatura deseada.

Tipos de elementos Los tres tipos de elementos más utilizados en termómetros son la espiral plana, la hélice simple y la hélice múltiple, y se ilustran en la figura 22-62.

Los termómetros bimetálicos se destinan a utilizarse a temperaturas que oscilan entre 583°C (1000°F) hasta −184°C (−300°F) e incluso a niveles inferiores. Sin embargo, a temperaturas bajas, el índice de deflexión se reduce con suma rapidez. Los termómetros bimetálicos no tienen una estabilidad muy prolongada a temperaturas superiores a 427°C (800°F).

Tanto las tiras como las espirales bimetálicas constituyen la base sensora para gran variedad de conmutadores de temperatura y controles termostáticos. La expansión diferencial entre dos metales que no están totalmente unidos en toda su longitud constituye la base de otro grupo de conmutadores de temperatura y controles termostáticos.

Termómetros de líquido en capilares de vidrio Las tres formas de termómetro de líquido en capilares de vidrio son: **1)** los totalmente hechos de vidrio (de cuello grabado o escala encerrada), **2)** de tubo y escala, y **3)** industriales. En la tabla 22-8 se presenta un resumen de las características de estas tres clases. Aunque los termómetros de líquido en capilares de vidrio no se utilizan en sistemas de control automático de procesos, sí se emplean mucho como dispositivos de medición para el control manual y en laboratorios de control. Debe tenerse sumo cuidado al utilizar el termómetro común de mercurio en capilares de vidrio, para que la condición de uso corresponda a la de calibración. En otras palabras, se producirán errores sustanciales si el termómetro calibrado para inmersión total se utiliza en inmersiones parciales.

Pirómetros "Pirometría de radiación" es la determinación de la temperatura de un objeto por medio de la cantidad y la naturaleza de la energía que irradia. Este campo de la pirometría ha producido varios dispositivos que se pueden clasificar ampliamente en dos grupos: **1)** los pirómetros ópticos, que son aquellos instrumentos en que la brillantez de un objeto caliente se compara con la de una fuente de brillantez estándar, y **2)** los pirómetros de radiación, que son los que miden el índice de emisión de energía por unidad de área, en una gama relativamente ancha de longitudes de onda, o los que comparan la radiación a dos longitudes de ondas. Los dispositivos de banda ancha se clasifican como pirómetros de radiación total.

TABLA 22-8 Característica de termómetros de líquido en capilares de vidrio

Clase y tipo	Intervalo		Exactitud
	°F.	°C.	
Todo de vidrio:			
Einchlus	−328 a +680	−201 a +360	Por lo común, 1 div. de esc.
Beckmann	−22 a +392	−30 a +200	± 0.002° a ± 0.005°C La esc. 5° o 6°C se debe ajustar al intervalo deseado
Clínico	+96 a +106	+35 a +41	± 0.2°F. (0.1°C.)
De laboratorio o químico	−328 a +1200	−201 a +648	Por lo común, 1 div. de escala 1 a 2 divisiones de escala
De registro máx. o mín.	−40 a +400	−40 a +204	
De tubo y escala:			
De recipiente en copa	−30 a +500	−22 a +260	Usualmente 1 división de escala
De recipiente de estaño, cobre o acero inoxidable	−40 a + 400	−40 a +204	Usualmente 1 división de escala
Industrial:			
De alcohol	−150 a +120	−100 a +50	Usualmente 1 división de escala
De mercurio	−40 a +1200	−40 a +648	Usualmente 1 división de escala

MEDICIONE

La presión, d
múnmente uti
altura de una
en su base. La
cuadrada, kilo
de mercurio y
estas y otras u
ción 1 de este
Los disposi
grupos: 1) los
de líquido, 2)
cámara de pres
Estándares
la industria o
procesamient
de mercurio, d

ecta, el otro sufre
a y al cuadrado de
rgo de la porción
tira bimetálica se
uno de sus extre-
ra un termómetro
imetálico se debe
l a lo largo del in-

más utilizados en
la hélice múltiple,

rse a temperaturas
°F) e incluso a nive-
lice de deflexión se
icos no tienen una
s a 427°C (800°F).

onstituyen la base
peratura y contro-
los metales que no
uye la base de otro
termostáticos.

lo Las tres formas
: 1) los totalmente
rada), 2) de tubo y
un resumen de las
ómetros de líquido
control automático
s de medición para
tenerse sumo cui-
en capilares de vi-
de calibración. En
el termómetro ca-
es parciales.

eterminación de la
la naturaleza de la
a producido varios
en dos grupos: 1)
ntos en que la bri-
a fuente de brillan-
on los que miden el
una gama relativa-
paran la radiación a
ancha se clasifican

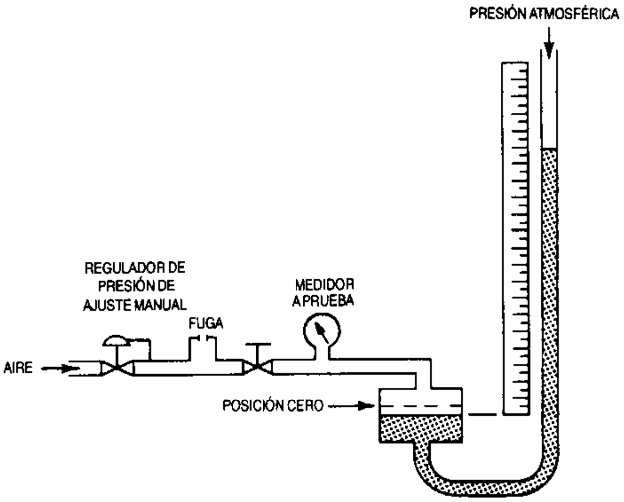


FIG. 22-63 Montaje de pruebas de un medidor de presión con columna de mercurio, que utiliza un manómetro tipo pozo o depósito.

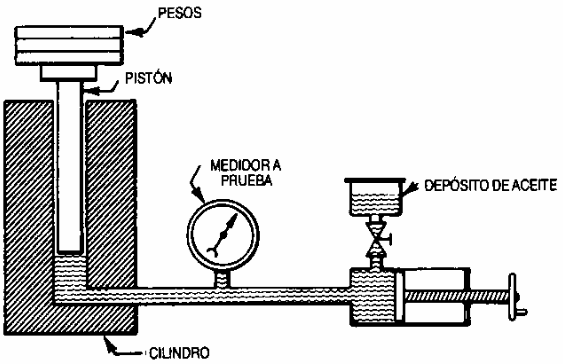


FIG. 22-64 Probador sencillo de pesos muertos.

MEDICIONES DE PRESIÓN

La presión, definida como fuerza por unidad de área, se expresa comúnmente utilizando unidades conocidas de peso-fuerza y área o la altura de una columna de líquido que produce una presión semejante en su base. Las unidades más comunes son libras-fuerza por pulgada cuadrada, kilogramos por centímetro cuadrado, pulgadas o milímetros de mercurio y pulgadas o pies de agua. Las tablas de conversión para estas y otras unidades de peso, fuerza y área, se encuentran en la Sección 1 de este *Manual del Ingeniero Químico*.

Los dispositivos para medir presiones en procesos se dividen en tres grupos: **1)** los que se basan en una medición de la altura de una columna de líquido, **2)** los que se basan en la medición de la distorsión de una cámara de presión elástica, y **3)** los dispositivos sensores de tipo eléctrico.

Estándares (patrones) y calibración Los estándares de presión en la industria o en los laboratorios de control asociados con plantas de procesamiento, consisten casi siempre en un manómetro de columna de mercurio, de precisión, un probador de pesos muertos y manómetros de prueba. Según la exactitud requerida, las mediciones auxiliares necesarias son presión barométrica, temperatura, longitud y constante gravitacional.

El manómetro de columna de mercurio de precisión que se utiliza es, casi siempre, alguna variación del manómetro de pozo que aparece en la figura 22-63. La presión ejercida sobre el manómetro que se está probando es una función de la presión barométrica que actúa en el extremo abierto del manómetro, la diferencia en elevación de los dos niveles de mercurio, la densidad del mismo y la constante gravitacional. Normalmente, el manómetro de mercurio se utiliza para presiones hasta un nivel aproximado de 172 kPa (25 lbf/in^2) manométrica. A presiones más elevadas, la altura de la columna de mercurio se convierte en un inconveniente.

El probador de pesos muertos se emplea casi siempre para presiones superiores que oscilan hasta 68.9 MPa (10 000 lbf/in^2). La forma básica del probador de pesos muertos se ilustra en la figura 22-64. La precisión de este probador depende de la calidad de las pesas, la exactitud

del diámetro del pistón y la lubricación de este último. Comercialmente, se encuentran exactitudes con un margen de 0.1%.

Los manómetros de prueba se emplean a menudo para la comparación directa con manómetros de proceso. Estos manómetros de prueba deben certificarse, en lo que respecta a su exactitud, a temperaturas y presiones barométricas prescritas, a través de laboratorios de pruebas comerciales y de National Bureau of Standards. Los manómetros de prueba usuales que se encuentran en el comercio tienen una precisión de 0.25% o menos, y se pueden comparar con probadores de pesos muertos.

Método de columnas de líquido Los dispositivos de columna de líquido para medir presiones son aquellos en que la presión que se mide se equilibra, o compara con la presión ejercida por una columna de líquido. Si la densidad del líquido se conoce, la altura de la columna de líquido es una medida de la presión. Casi todos los dispositivos de columna líquida para medir presiones se llaman comúnmente *manómetros*. En los casos en que la altura del líquido se observa en forma visual, las columnas del líquido están contenidas en tubos de vidrio u otros materiales transparentes. La altura de dicha columna se mide en unidades de longitud o puede calibrarse también en unidades de presión.

Según sea el intervalo de presión, los líquidos más utilizados son el agua y el mercurio. Puesto que la densidad del líquido empleado varía con la temperatura, dicha temperatura se debe tomar en cuenta para mediciones de presión exactas. En la sección 5 de este *Manual del Ingeniero Químico* se describen algunas variaciones de manómetros.

Métodos de elemento elástico Los dispositivos de elemento elástico para la medición de presiones son aquellos en que las presiones medidas deforman algún material elástico (casi siempre metálico), dentro de su límite elástico, y la magnitud de dicha deformación es aproximadamente proporcional a la presión aplicada. Estos dispositivos se clasifican en general en tres tipos: el tubo de Bourdon, los fuelles y el diafragma.

Elementos del tubo de Bourdon Es probable que el dispositivo para medir presiones de empleo más frecuente sea el manómetro de presión de tubo de Bourdon con resorte en C, como el que se ilustra en la figura 22-65. Los manómetros de este tipo general se encuentran en una amplísima variedad de intervalos de presión, estilos de receptáculo, tamaños de carátula y materiales de construcción. Los materiales se seleccionan de acuerdo con el intervalo de presión, la resistencia a la corrosión producida por los materiales del proceso y el efecto de la temperatura en la calibración. Existen muchos tipos de manómetros calibrados con presión, al vacío, en forma compuesta (combinando presión y vacío) y con intervalos de cero suprimido.

Elementos de fuelle El elemento de fuelle es un cilindro axialmente elástico, que tiene dobleces o repliegues profundos. Los fuelles se pueden utilizar sin abrirse, o bien, restringirse por medio de un resorte de oposición, como se observa en la figura 22-66. La presión que se desea medir se puede aplicar ya sea en el interior o en el espacio que queda fuera del fuelle, exponiendo el otro lado a la presión atmosférica. Para mediciones de presión absoluta, el interior o el espacio exterior del fuelle se pueden vaciar y sellar. Las presiones diferenciales se miden aplicando presiones a lados opuestos de un solo fuelle o a dos fuelles contrarios.

Elementos de diafragma Los elementos de diafragma se clasifican en dos tipos principales: los que utilizan las características elásticas del diafragma y los que encuentran la oposición de un resorte u otro elemento elástico separado.

El primer tipo consiste, casi siempre, en una o más cápsulas, cada una de las cuales se compone de dos diafragmas unidos por medio de soldadura blanda, soldadura de cobre o soldadura térmica. Los diafrag-

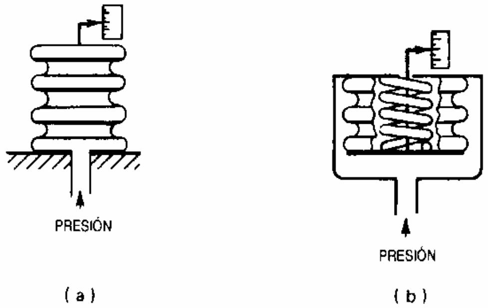


FIG. 22-66 Elementos usuales de fuelle. *a*) Fuelles no opuestos. *b*) Fuelles de resorte.

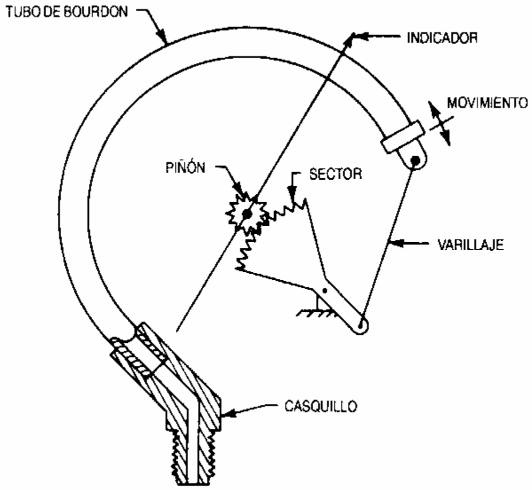


FIG. 22-65 Medidor típico de presión de tubo de Bourdon en C y sistema articulado del indicador.

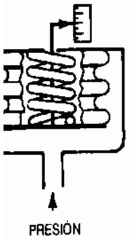
mas son dis
lineal de de
más o meno
cápsulas pa
67. Los me
incluyen br
Los interva
agua hasta,
La segun
ejercer una
un diafragm
El movimie
determina l
tipo de dia
mente baja
En la figu
to. El eleme
fuerza de pr
pequeño mo
diafragmas

sta (combinando

lindro axialmente
.os fuelles se pue-
o de un resorte de
sión que se desea
spacio que queda
atmosférica. Para
pacio exterior del
enciales se miden
lle o a dos fuelles

gma se clasifican
sticas elásticas del
resorte u otro ele-

ás cápsulas, cada
idos por medio de
mica. Los diafrag-



puestos. *b*) Fuelles

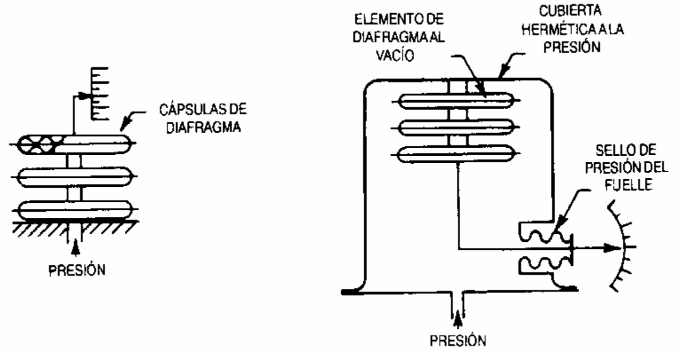


FIG. 22-67 Elementos usuales de cápsulas múltiples para medir presión. *a*) Presión manométrica. *b*) Presión absoluta.

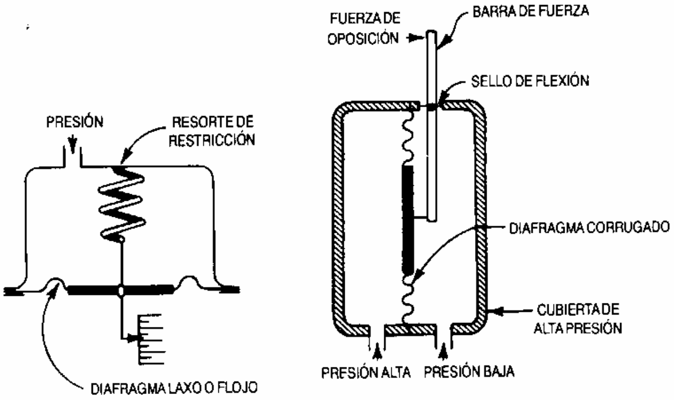


FIG. 22-68 Elementos usuales de diafragma para presión. *a*) Elemento de diafragma laxo o flojo. *b*) Elementos de balanza de fuerza para presión diferencial.

mas son discos metálicos circulares planos o corrugados. El intervalo lineal de deflexión en función de la presión para una sola cápsula es, más o menos, pequeño, de manera que comúnmente se conectan varias cápsulas para aumentar la deflexión, como se observa en la figura 22-67. Los metales de empleo más frecuente en elementos de diafragma incluyen bronce, bronce al fósforo, cobre-berilio y acero inoxidable. Los intervalos disponibles van desde fracciones de una pulgada de agua hasta, aproximadamente, 206.8 kPa (30 lbf/in^2) manométrica.

La segunda clase de diafragma se utiliza para contener la presión y ejercer una fuerza sobre el elemento elástico de oposición. Se trata de un diafragma flexible o laxo de hule, cuero, tela impregnada o plástico. El movimiento del diafragma encuentra la oposición de un resorte que determina la deflexión a una presión dada (véase la Fig. 22-68*a*). Este tipo de diafragma se utiliza para mediciones de presión extremadamente bajas, vacío o presión diferencial.

En la figura 22-68*b* se ilustra otro elemento de diafragma de tipo opuesto. El elemento de diafragma se emplea por lo general, para transmitir la fuerza de presión a un transmisor de balance de fuerzas, por medio de un pequeño movimiento del diafragma (véase también la Fig. 22-95). Los diafragmas de esta clase pueden ser metálicos (ya sea planos o corruga-

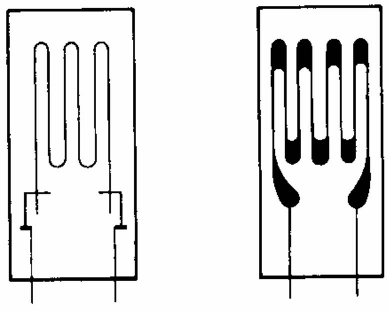


FIG. 22-69 Medidores unidos de deformación. *a*) Tipo alambre. *b*) Tipo papel metálico.

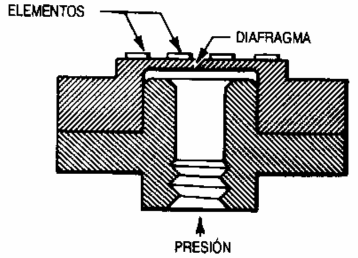


FIG. 22-70 Elemento usual de un medidor de presión de deformación unido.

dos), o bien, laxos. Se encuentran diferentes configuraciones para medir presiones manométricas, absolutas y diferenciales.

Métodos eléctricos

Extensómetros Cuando un alambre u otro conductor eléctrico se estira o extiende elásticamente, su longitud aumenta y su diámetro disminuye. Estos dos cambios dimensionales generan un aumento en la resistencia eléctrica del conductor. Los dispositivos que utilizan rejillas de alambre de resistencia para medir pequeñas distorsiones en materiales sometidos a tensiones elásticas, se denominan usualmente extensómetros. Los elementos medidores de presión que utilizan extensómetros, son de muy variadas formas. Por lo común, constan de uno de los elementos elásticos antes descritos, a los cuales se han conectado uno o más extensómetros para medir la deformación.

Hay dos formas básicas de extensómetros: los adheridos y los no adheridos. Los extensómetros adheridos son los que están unidos directamente a la superficie del elemento elástico cuya deformación se va a medir. Los conductores pueden ser de alambre o papel metálico grabado, como se ilustra en la figura 22-69. Los manómetros de tipo de alambre se construyen con alambres cuyos diámetros van de 0.254 a 0.381 mm (1 a 1.5 mils). Los dos tipos se utilizan aglutinados a un portador o a una base de plástico o papel que, a su vez, se adhiere a la superficie elástica, como se observa en la figura 22-70.

El transductor de extensómetro no adherido consta de un marco fijo y una armadura que se mueve con respecto al marco en respuesta a la presión medida. Los filamentos de alambre del extensómetro se distienden entre la armadura y el marco. En la figura 22-71 se presenta un transductor de extensómetro no adherido activado con un diafragma, que constituye un ejemplo usual.

Los extensómetros se conectan, casi siempre, en forma eléctrica, siguiendo la ya conocida configuración de puente de Wheatstone, que se muestra en la figura 22-72. En los puentes de dos brazos ac-

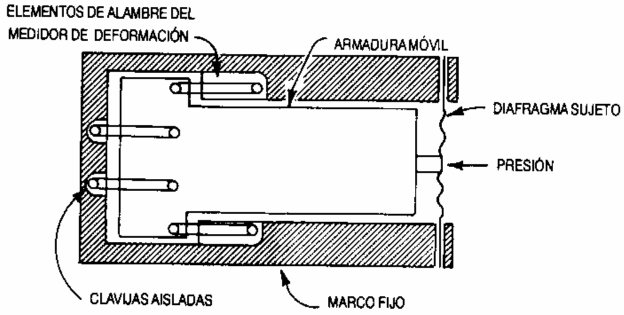


FIG. 22-71 Elemento no unido de un medidor de presión de deformación.

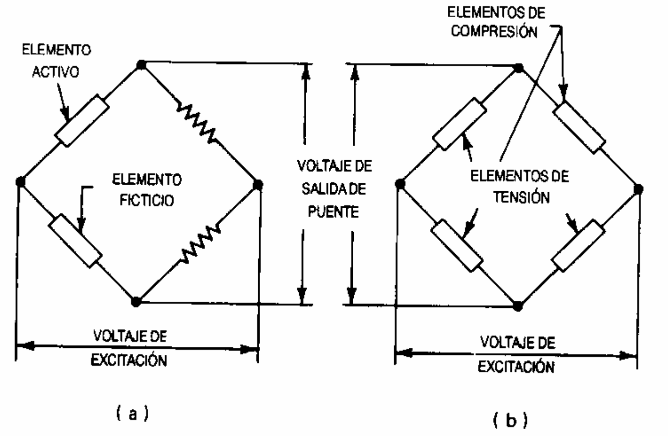


FIG. 22-72 Configuraciones usuales de medidores de deformación de puente. *a*) Puente de dos brazos activos. *b*) Puente de cuatro brazos activos.

tivos, el ele
a tensión, y
tida a tensió
ca de los so
mentos del
cuatro braz
nera que es
incrementa
compresión
sensibilidad
racterística
tensómetros
de excitació
de salida de
lores físicos
Los transd
formas para
así como vac
completa de
Los extensó
ma sensible
extraordinar
námicas de a
Transduc
presión de ex
semiconduct
cia varía con
ductor y las
extensómetr
piezorresisti
más elevado
voltajes de s
Transduc
una diferenci
a una tensión
tricos de pre
una deforma
eléctrica ext
cuencias baj
para medir p

MEDICION

REFERENCIAS
forme de ASM
York, 1959. Sp
Foxboro Co.,
El flujo, defi
específicas d
res de despla
desplazamie
divide en vol
de estos volú
El términ
medidores d
dades aislada
medio de un
secundario.
puesta del dis
cidas o graci
Las princip
que se utiliza
variable, desp
vertederos y
recientement
los medidores
tos dispositiv

istorsiones en ma-
in usualmente ex-
ue utilizan exten-
n, constan de uno
es se han conecta-
ión.
dheridos y los no
e están unidos di-
a deformación se
o papel metálico
inómetros de tipo
tros van de 0.254
aglutinados a un
ez, se adhiere a la
70.
a de un marco fijo
en respuesta a la
ensómetro se dis-
-71 se presenta un
on un diafragma,

i forma eléctrica,
de Wheatstone,
le dos brazos ac-

tivos, el elemento activo se monta en la parte elástica sometida a tensión, y el elemento ficticio se monta en una parte no sometida a tensión. Esta configuración compensa la expansión térmica de los soportes, así como el cambio de resistencia de los elementos del extensómetro con la temperatura. En el puente de cuatro brazos activos, dos de los elementos se montan de tal manera que estén colocados en tensión por medio de una presión incrementada, en tanto que los otros dos se colocan ya sea en compresión o sin alguna tensión. Esta configuración aumenta la sensibilidad del transductor al mismo tiempo que conserva la característica de compensación de temperatura. Los puentes extensómetros estándares están diseñados para soportar voltajes de excitación de 20 V o menos, ya sea en ca o en cd. El voltaje de salida del puente es comparativamente bajo, y se obtienen valores físicos de escala completa hasta de 4 mV/V de excitación.

Los transductores de presión de extensómetro se fabrican en muchas formas para medir presiones manométricas, absolutas y diferenciales, así como vacíos. Se encontrarán dispositivos con intervalos de escala completa de 254.0 mm (10 in) de agua a 1034 MPa (150 000 lbf/in^2). Los extensómetros adheridos directamente a un elemento de diafragma sensible a la presión tienen, por lo común, un tiempo de respuesta extraordinariamente rápido, y son apropiados para medir presiones dinámicas de alta frecuencia.

Transductores piezorresistivos Una variación del transductor de presión de extensómetro de tipo común utiliza hojuelas o plaquitas de semiconductor de un solo cristal, casi siempre de silicio, cuya resistencia varía con deformaciones o distorsiones. La construcción del transductor y las configuraciones eléctricas son similares a las que utilizan extensómetros tradicionales. La ventaja principal de los transductores piezorresistivos son que tienen una salida de voltaje de puente mucho más elevado y su tamaño es más reducido. Por lo común se obtienen voltajes de salida a escala completa de 50 a 100 mV/V de excitación.

Transductores piezoeléctricos Hay ciertos cristales que producen una diferencia de potencial entre sus superficies cuando se les somete a una tensión en direcciones apropiadas. Los transductores piezoeléctricos de presión generan una diferencia de potencial proporcional a una deformación generada por dicha presión. Debido a la impedancia eléctrica extremadamente alta de los cristales piezoeléctricos a frecuencias bajas, estos transductores no son en general muy apropiados para medir presiones estáticas de procesos.

MEDICIONES DE FLUJO

REFERENCIAS GENERALES: "Fluid Meters - Their Theory and Application", informe de ASME Research Committee on Fluid Meters, 5th ed., ASME, New York, 1959. Spink, *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, 9th ed., Foxboro Co., Foxboro, Mass., 1967.

El flujo, definido como volumen por unidad de tiempo en condiciones específicas de temperatura y presión, se mide usualmente con medidores de desplazamiento positivo o de velocidad. El término "medidor de desplazamiento positivo" se aplica a un dispositivo en que el flujo se divide en volúmenes aislados medidos, en donde el número de llenado de estos volúmenes se cuenta de alguna manera.

El término "medidor de velocidad" se aplica a todos los tipos de medidores de flujo por los que pasa el material sin dividirse en cantidades aisladas. El movimiento del material se detecta casi siempre por medio de un elemento primario de medición que activa un dispositivo secundario. El gasto o velocidad de flujo se infiere entonces de la respuesta del dispositivo secundario, por medio de las leyes físicas conocidas o gracias a relaciones derivadas en forma empírica.

Las principales clases de instrumentos de medición de flujo o corriente que se utilizan en las industrias de proceso son los de carga variable, área variable, desplazamiento positivo, turbina, medidores de flujo en masa y vertederos y canalones para medir la corriente en canales abiertos, y más recientemente, los medidores de flujo por derramamiento en remolino y los medidores ultrasónicos. En la Sección 5 se presentan ejemplos de estos dispositivos, excepto los medidores de flujo por derramamiento en remolino y los ultrasónicos, además de presentar los principios que rigen su empleo. Los medidores de flujo por derramamiento en remolino y los ultrasónicos se analizan a continuación.

Medidores de flujo por derramamiento en remolino Estos medidores de flujo aprovechan el derramamiento que ocurre al formarse un remolino cuando un fluido pasa sobre un objeto no hidrodinámico (cuerpo obtuso). Al suceder esto, el flujo no puede seguir la forma del objeto y se separa de él formando remolinos en las superficies laterales del objeto. A medida que el remolino se mueve corriente abajo aumenta de tamaño y se separa finalmente del objeto. El derramamiento tiene lugar de manera alternativa hacia cada lado del objeto y la velocidad de formación del remolino y el derramamiento es directamente proporcional al gasto o velocidad de flujo volumétrico.

Los medidores de flujo de este tipo se distinguen de manera notable por los métodos aplicados para detectar los remolinos formados. Existen cuatro métodos principales de empleo actual, que son los siguientes:

1. Un método emplea un termistor que se monta de manera que sea enfriado en forma cíclica a consecuencia del flujo del fluido a medida que pasa el remolino. La resistencia eléctrica del termistor varía con la temperatura.

2. Como los remolinos sufren derramamiento en forma alterna en cada lado del objeto que obstruye el flujo, es posible emplear un orificio de presión para desviar una esfera o disco de metal ligero hacia atrás y hacia adelante a medida que pasa el remolino. Este segundo método utiliza una bobina magnética para contar las oscilaciones del disco o de la esfera.

3. El tercer método cuenta los derrames con una aleta que se extiende hasta la parte posterior del cuerpo de obstrucción. Los remolinos alternados mueven la aleta de lado a lado conforme pasan. Lo que se detecta en este método es el movimiento de la aleta o el esfuerzo mecánico que se induce sobre la misma.

4. El último método emplea transmisores y receptores ultrasónicos que detectan los remolinos. Los remolinos pueden detectarse con un haz sónico que cruza la corriente de fluido desde el objeto que obstruye o con la reflexión o refracción del haz sónico desde los remolinos que se dirigen corriente abajo.

Sin importar cuál es el método que se emplea para contar los remolinos, éstos se utilizan para desarrollar una señal que es directamente proporcional al flujo. Las señales son digitales y pueden totalizarse de modo muy fácil; en consecuencia, son compatibles con los sistemas de control digital. Se requiere relaciones de la señal del orden de 10:1 o 20:1, a condición de que el flujo se mantenga turbulento. Si el número de Reynolds es mayor de 30 000, es posible mantener una exactitud adecuada sin que importen los cambios en la densidad, la viscosidad, la temperatura o la presión.

Medidores de flujo ultrasónicos Todos los medidores de flujo comprendidos en esta categoría se basan en los retrasos de tiempo variables de las ondas sonoras recibidas, las cuales surgen cuando la velocidad de flujo varía. Existen dos técnicas para medir el flujo, cada una de las cuales se utiliza según la limpieza del líquido.

En la primera técnica se insertan dos transductores opuestos en la tubería, de manera que uno se encuentra corriente abajo respecto al otro. Una vez instalados los transductores, no se utilizan para medir la velocidad del sonido, sino la diferencia entre la velocidad a la que viaja el sonido en la dirección del flujo y la velocidad a la que viaja en dirección contraria al flujo.

La velocidad diferencial se mide de dos maneras: 1) por retraso directo de tiempo, mediante el empleo de dispositivos destructores de las ondas sonoras; 2) por cambios de la frecuencia derivados de las señales emitidas y su correspondiente medición. La técnica de la medición de frecuencia se prefiere a la técnica por retraso de tiempo, ya que es muy sencilla y no depende de la velocidad estática del líquido. Si se requiere conservar una uniformidad de la trayectoria de medición, es necesario que el líquido sea relativamente limpio.

En la segunda técnica es preciso que el líquido contenga partículas o burbujas diseminadas, que reflejen las ondas sonoras. Estas partículas o burbujas deberían viajar a la velocidad del líquido. Un método Doppler se aplica por transmisión de las ondas sonoras a lo largo de la

trayectoria de flujo, y se mide el cambio de frecuencia en la señal que regresa de estas partículas o burbujas. Este cambio de frecuencia es proporcional a la velocidad del líquido.

Las dos técnicas de medición dan respuesta a la velocidad promedio del líquido en la trayectoria de la onda sonora. Como el perfil de velocidad cambia con el número de Reynolds, también se ve afectado el coeficiente que relaciona la medición con la velocidad de flujo. En particular, existen dos coeficientes distintos para cada una de las regiones, laminar y turbulenta. Los errores en la zona de transición que existe entre las regiones de flujo laminar y turbulento son mucho mayores que en cada una de dichas regiones, ya que en esa zona los patrones de flujo no son predecibles.

MEDICIÓN DE NIVEL

La medición del nivel se puede definir como la determinación de la ubicación de la entrecara entre dos fluidos, separables por gravedad, con respecto a un plano de referencia fijo. La medición de nivel más común es la de la entrecara entre un líquido y un gas. Otras mediciones de nivel que se encuentran con suma frecuencia son la entrecara de dos líquidos, entre sólidos granulares o fluidificados y un gas, y entre un líquido y su vapor.

Las bases utilizadas para clasificar los dispositivos de nivel son: visuales, activados por flotador, de desplazador, de carga y un grupo misceláneo que depende primordialmente de las características del fluido.

Dispositivos visuales Esta categoría comprende dispositivos como la varilla de inmersión, la escala de plomada y cinta, el manómetro abierto y el vidrio de nivel o columna indicadora.

Vidrio de nivel El dispositivo visual para medir niveles en procesos que se emplea más a menudo es el vidrio de nivel o columna indicadora. Este dispositivo puede considerarse como un manómetro en el cual el nivel de fluido del proceso, dentro del medidor, busca la misma elevación que en el depósito. El vidrio de nivel se instala casi siempre con válvulas que permiten que este medidor quede aislado del depósito y se pueda extraer sin que éste pierda presión. Las válvulas de cierre pertenecen con frecuencia a la forma de compensación, de manera que el tubo o la cámara se pueden limpiar sin desmantelar el dispositivo.

El vidrio tubular de nivel está limitado usualmente a 3103 kPa (450 lbf/in^2) y 240°C (400°F). Se requiere una construcción especializada para temperaturas y presiones más elevadas. A temperaturas y presiones más altas, los que se utilizan son los medidores de vidrio plano, como los que se muestran en la figura 22-73.

Cuando se desea observar el color u otras características del líquido, así como la entrecara entre dos líquidos, se utiliza un medidor de tipo *transparente*. Esta clase consta de dos placas de vidrio en ambos lados de la cámara para el líquido. La visibilidad de una entrecara en el medidor transparente se incrementa a menudo iluminándolo desde la parte posterior.

Los vidrios de nivel de reflejo sólo utilizan una placa de vidrio que tiene prismas reflejantes moldeados en el lado del vidrio que está en contacto con el fluido. La luz incidente que proviene de la parte delantera del dispositivo se refleja internamente, dando a la mirilla en forma de ranura un aspecto semejante al de un espejo blanco, si hay gas o vapor en contacto con dicho vidrio. El líquido en contacto con el vidrio hace que la luz incidente se transmita a través de él y se absorba en la cámara de fluido, confiriéndole un aspecto oscuro a la mirilla en forma de ranura. Esta construcción genera una indicación clara del nivel incluso con líquidos transparentes.

Dispositivos activados por flotador Los dispositivos que se activan por medio de un flotador se caracterizan por un miembro flotante que queda suspendido en la entrecara de los dos fluidos. Puesto que por lo común se requiere una fuerza sustancial para mover el mecanismo indicador, estos aparatos se limitan casi siempre a las entrecaras líquido-gas. Mediante un pesado correcto del flotador, se pueden utilizar para medir entrecaras de líquido-líquido.

Los dispositivos activados por flotador se clasifican basándose en el método empleado para acoplar el movimiento del flotador con el sistema indicador.

Medidores de flotador de cadena o cinta En estos tipos de dispositivos, el flotador se conecta a un mecanismo indicador por medio de una cadena o una cinta flexible. En la figura 22-74 se ilustra una instalación típica de este tipo de dispositivo. Estos medidores de nivel se emplean comúnmente en tanques de almacenamiento de gran tamaño instalados al aire libre.

El indicador de nivel de tablero a escala está provisto de un contrapeso para mantener la cinta o cadena tensa. Se utiliza una cinta perforada para mover los cuadrantes indicadores del nivel a través de una rueda dentada en el medidor de lectura a nivel de tierra. La cinta se almacena en la cabeza del medidor en un carrete con resorte. El flotador es, casi siempre, una pieza metálica hueca de forma circular, con alambres de guía que van de la parte superior a la inferior del tanque, para limitar su movimiento.

Mecanismo de palanca y eje En depósitos presurizados, se emplean con frecuencia mecanismos activados con palanca y eje, para efectuar las mediciones de nivel. Como se ilustra en la figura 22-75, esta clase de mecanismo consta de un flotador metálico hueco y una palanca conectada a un eje giratorio que transmite movimiento al flotador hacia el exterior del depósito, por medio de un sello rotatorio mecánico.

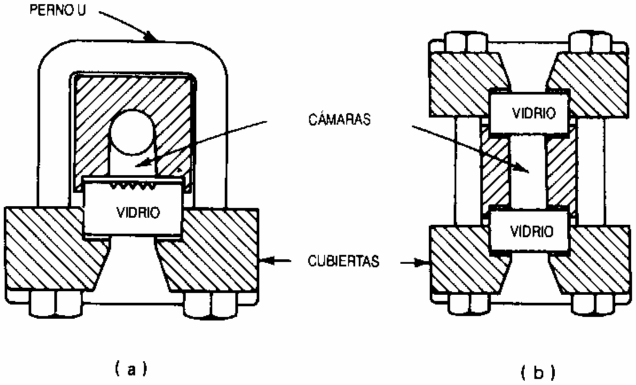


FIG. 22-73 Vidrios medidores de vidrio plano. *a*) Sección transversal de un medidor reflector. *b*) Sección transversal de un medidor transparente.

rio en ambos lados
entrecara en el me-
ndolo desde la par-

placa de vidrio que
vidrio que está en
e de la parte de lan-
la mirilla en forma
lanco, si hay gas o
ntacto con el vidrio
l y se absorba en la
la mirilla en forma
clara del nivel in-

sitivos que se acti-
miembro flotante
dos. Puesto que por
over el mecanismo
as entrecaras líqui-
se pueden utilizar

an basándose en el
flotador con el sis-

os tipos de disposi-
ador por medio de
se ilustra una insta-
didores de nivel se
nto de gran tamaño

visto de un contra-
za una cinta perfo-
vel a través de una
tierra. La cinta se
n resorte. El flota-
forma circular, con
nferior del tanque,

surizados, se em-
palanca y eje, para
en la figura 22-75,
tálico hueco y una
movimiento al flo-
un sello rotatorio

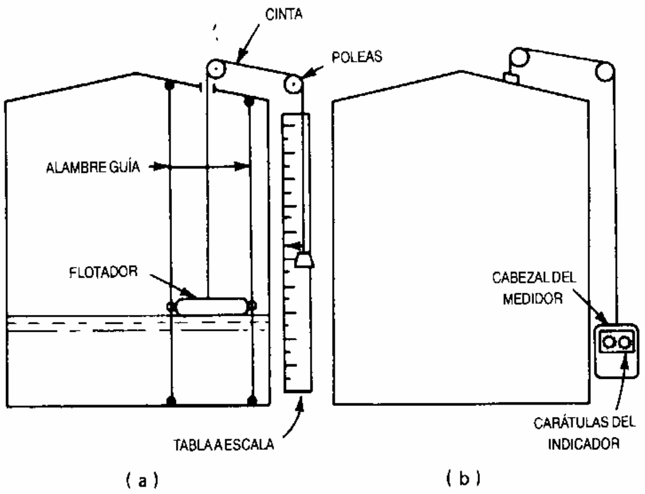


FIG. 22-74 Medidores de flotador y cinta. *a*) Indicador de tabla a escala. *b*) Medidor de lectura en tierra.

Dispositivos magnéticamente acoplados Se ha desarrollado una gran variedad de medidores de nivel activados por flotador, que transmiten el movimiento de éste por medio de un acoplamiento magnético. A esta clase pertenecen, como ejemplo usual, los interruptores de nivel operados magnéticamente y los de flotador con conexión magnética.

En la figura 22-76 se ilustra un medidor con flotador de conexión magnética. Este dispositivo consta de un flotador hueco que lleva en su interior un imán, y que se desplaza a lo largo de un tubo de guía vertical de índole no magnética. El imán seguidor suspendido por medio de una cinta mueve un cuadrante indicador similar al del dispositivo de flotador de cinta común. El flotador y el tubo de guía, que están en contacto con el fluido que se está midiendo, se producen en gran variedad de materiales, tomando en cuenta condiciones de resistencia a la corrosión y para soportar altas presiones o vacío. También se encuentran flotadores sopesados para entrecaras líquido-líquido.

El acoplamiento magnético se utiliza con frecuencia en dispositivos eléctricos para la medición de niveles. En la figura 22-77 se ilustra un aparato usual de esta naturaleza.

Dispositivos de desplazador Los dispositivos para medir niveles activados por un desplazador emplean la fuerza boyante o de flotación ejercida sobre un desplazador parcialmente sumergido, como medida de la ubicación de la entrecara a lo largo del eje del desplazador. El movimiento vertical de éste se restringe casi siempre por medio de un miembro elástico, cuyo movimiento o distorsión es directamente proporcional a la fuerza de flotación y, por ende, al nivel de la entrecara. El intervalo se limita a la longitud del desplazador. El acoplamiento de la acción del flotador con el mecanismo indicador se obtiene, casi siempre, por medio de algún mecanismo sin empaquetadura que, con frecuencia, constituye también el miembro elástico de restricción.

Puesto que la fuerza de flotabilidad depende de la diferencia de densidad entre los fluidos medidos, la medición exacta del nivel con dispositivos de desplazamiento depende del conocimiento exacto de las densidades del fluido.

Desplazador de tubo de torsión Uno de los aparatos que se utiliza con mayor frecuencia para medir niveles es el desplazador de tubo de torsión que se ilustra en la figura 22-78. El desplazador se suspende de cualquier varilla de desplazamiento conectada a un tubo de torsión. Éste queda fijo en el extremo superior y se sostiene sobre un cojinete de arista delgada en el extremo inferior. Además de actuar como el miembro elástico, el tubo de torsión constituye también una barrera sin

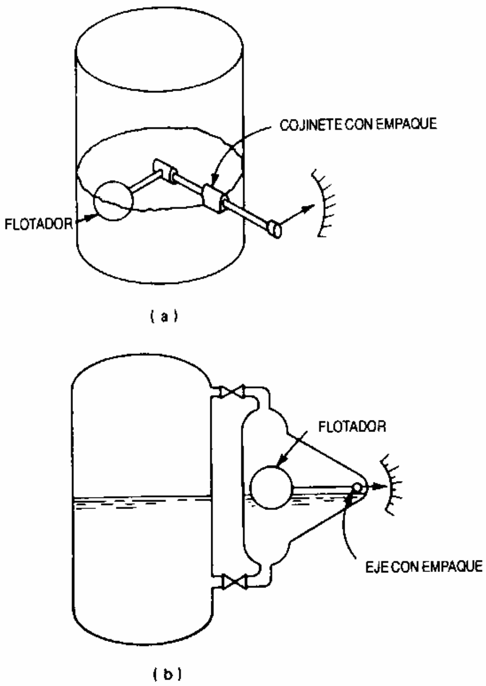


FIG. 22-75 Mecanismos de flotador de nivel y eje. *a*) Medidor de flotador interno. *b*) Medidor de flotador externo.

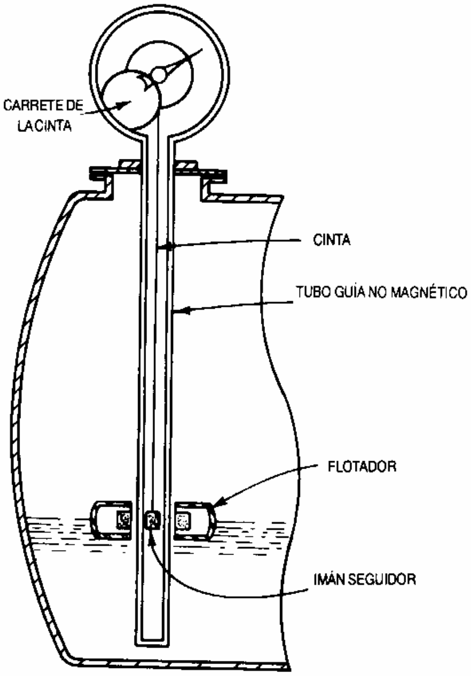


FIG. 22-76 Medidor con flotador de unión magnética.

empaquetamiento hermética a la presión. Dentro de dicho tubo, se encuentra un eje que se fija al mismo en el extremo interior. La rotación (de 5 a 10°) del extremo exterior del eje es proporcional a la fuerza de flotabilidad ejercida en el desplazador. Los retrocesos bruscos se eliminan poniéndole pesas al desplazador, de tal modo que se hunda en el líquido que se está midiendo.

Puesto que la rotación del eje es restringida, este tipo de dispositivo se asocia, casi siempre, con un transmisor o controlador neumático o electrónico. Las partes humedecibles se producen en materiales resistentes a la corrosión o a temperaturas elevadas. El montaje de empleo más frecuente para los dispositivos de esta naturaleza consiste en una jaula exterior para el desplazador, pero también se encuentran aparatos de desplazador montados en la parte superior o en forma lateral.

Desplazador magnéticamente acoplado En la figura 22-79 se ilustra una unidad activada por desplazador que emplea el acoplamiento magnético. Los aparatos de esta índole tienen por lo común un desplazador restringido por medio de un resorte, y mueven un imán propulsor, que va encerrado en un tubo protector. El movimiento del imán propulsor se transmite al mecanismo indicador por medio de un seguidor de imán que va fuera del tubo protector. Los dispositivos de esta clase se montan, casi siempre, en jaulas externas para el desplazador.

Desplazador de tubo de flexión En la figura 22-80 se ilustra un dispositivo de desplazador comparativamente sencillo, que consta de un flotador elíptico o cilíndrico montado sobre un brazo corto, que se conecta al extremo libre de un tubo flexible cuyo extremo fijo va unido a una brida de sujeción. Una porción del tubo cercana a la brida de sujeción se aplana para incrementar la flexibilidad. El movimiento del extremo del flotador del tubo se transmite fuera de la cámara del mismo por medio de una varilla que se extiende a través del tubo. Esos dispositivos se emplean, casi siempre, para activar en forma directa un interruptor eléctrico o un piloto neumático. Existe un dispositivo similar que utiliza como miembro elástico un disco flexible por el cual pasa la varilla del flotador.

Dispositivo de carga Hay una extensa variedad de dispositivos que emplean la carga hidrostática como medición del nivel. Como sucede en el caso de los dispositivos de desplazador, la medición exacta del nivel por medio de una carga hidrostática exige el conocimiento preciso de las densidades de ambos fluidos, el de la fase pesada y el de la fase ligera. La mayor parte de esta clase de sistemas utiliza dispositivos de medición de presión estándar y presión diferencial.

Sistemas de manómetro en depósitos abiertos La aplicación más simple de la medición de niveles por medio de cargas es la determinación del nivel de un líquido en un depósito abierto. El elemento que

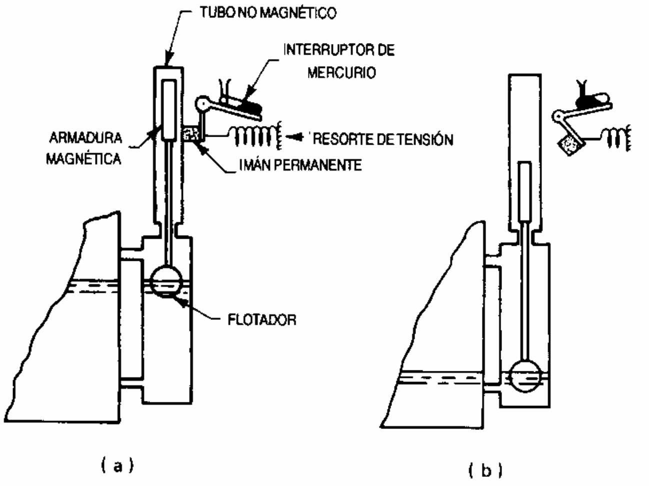


FIG. 22-77 Interruptor de nivel activado magnéticamente. *a*) Nivel elevado. *b*) Nivel bajo.

mide la presión
éste, o bien, en
sión que conect
una pendiente
cados por aire u
drenaje en el el
mentos de la tu

Sistemas de
bujeador más
ubicación del e
instalación usu
presión debida
bra emplear un

IM
IMP

FIG. 22-79 Uni

sos bruscos se eli-
lo que se hunda en

tipo de dispositivo
lador neumático o
n materiales resis-
montaje de empleo
za consiste en una
ncuentran aparatos
forma lateral.
igura 22-79 se ilus-
a el acoplamiento
común un despla-
n un imán propul-
vimiento del imán
medio de un segui-
lispositivos de esta
ra el desplazador.
80 se ilustra un dis-
o, que consta de un
zo corto, que se co-
emo fijo va unido a
a la brida de suje-
novimiento del ex-
cámara del mismo
l tubo. Esos dispo-
ma directa un inte-
dispositivo similar
e por el cual pasa la

de dispositivos que
nivel. Como sucede
edición exacta del
conocimiento pre-
se pesada y el de la
utiliza dispositivos
ial.
La aplicación más
as es la determina-
o. El elemento que

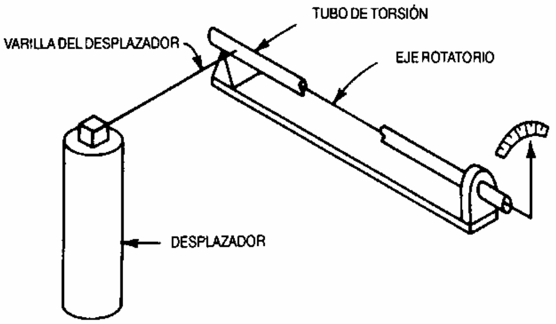


FIG. 22-78 Dispositivo desplazador para medir niveles.

mide la presión se ubica en el mínimo nivel de operación, o debajo de éste, o bien, en la conexión de salida del proceso. Las tuberías de presión que conectan al depósito con el elemento de medición deben tener una pendiente ascendente hacia el depósito, para evitar errores provocados por aire u otros gases atrapados. Se debe conectar una válvula de drenaje en el elemento de medición para permitir la salida de los sedimentos de la tubería.

Sistemas de tubo de burbujas El sistema de tubo de burbujas o burbujeador más utilizado reduce notablemente las restricciones en la ubicación del elemento de medición. En la figura 22-81 se ilustra una instalación usual. Para eliminar o reducir variaciones en la caída de presión debidas a la velocidad de desplazamiento del gas, se acostumbra emplear un regulador de diferencial constante para mantener un

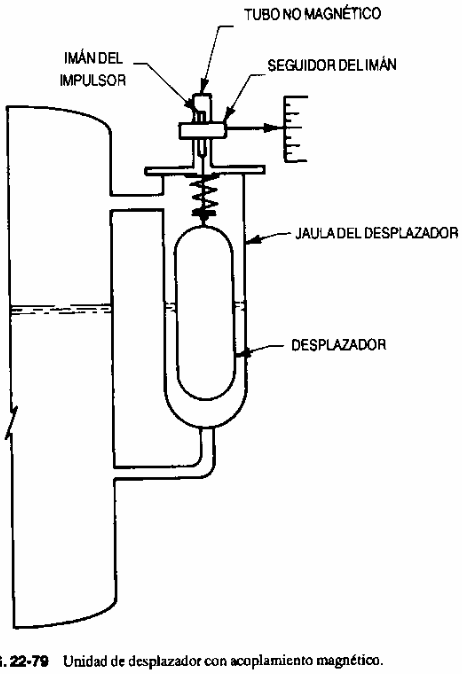


FIG. 22-79 Unidad de desplazador con acoplamiento magnético.

gasto uniforme de gas. Puesto que la corriente de gas por un tubo de burbujas evita la entrada de líquido de proceso al sistema de medición, esta técnica es útil sobre todo para ser empleada con líquidos corrosivos o viscosos, líquidos sujetos a congelación y líquidos que contienen sólidos arrastrados.

Sistemas de carga en depósitos a presión En depósitos presurizados, la medición del nivel de líquidos por medio de cargas hidrostáticas difiere de la que se realiza en depósitos abiertos, en cuanto lo que se mide es una presión diferencial. Las aplicaciones de esta técnica pueden utilizar casi cualquiera de los dispositivos comunes para medir presiones diferenciales.

Es de vital importancia dar la atención debida a todos los detalles de la instalación. Por ejemplo, es preciso conocer el carácter y la densidad del fluido en todas las partes del sistema. Las cargas hidrostáticas que no son pertinentes a la medición deseada se deben eliminar o compensarlas de alguna manera. Por ejemplo, se podría utilizar un elemento tipo diafragma común para presiones diferenciales. El nivel que queda por encima de la conexión inferior se mide por medio de la presión diferencial ejercida en el elemento de medición. Esta determinación será exacta sólo si se satisfacen las siguientes condiciones: se debe compensar cualquier desviación de la densidad del líquido; que la conexión al lado de baja presión del elemento de medición no contenga ningún líquido acumulado debido a rebosamientos o condensación; que la densidad del gas o el vapor encima del líquido sea despreciable o se le compense de alguna manera, y que el elemento de medición quede ubicado a la misma elevación que el nivel mínimo que se va a medir, o bien, que se haga la compensación adecuada correspondiente.

Servicio de líquidos en ebullición Las condiciones que se describieron para el sistema de carga simple no se satisfarán si el líquido se encuentra en su punto de ebullición o cerca de él y si su temperatura es mayor que la ambiente. Para esta clase de aplicaciones, se puede utilizar el sistema que aparece en la figura 22-82.

El líquido se condensa en el lado de baja presión del elemento de medición y en el recipiente del condensado, hasta que un sobreflujo o rebosamiento lo retorna al depósito. Esto constituye un "brazo de referencia" en el cual hay una carga constante conocida. Esta carga se puede suprimir en la mayor parte de los elementos de medición de presión diferencial por medio de un ajuste a cero, o bien, un mecanismo de supresión de cero.

En los sistemas que tienen esta configuración, el elemento de medición se puede situar debajo de la conexión inferior, sin ninguna otra compensación, ya que se agrega la misma carga hidrostática a ambos lados del elemento de medición.

El recipiente del condensado proporciona también un sello líquido, que se aprovecha para evitar que los fluidos corrosivos o a alta temperatura entren en contacto con el elemento de medición propiamente dicho. Cuando el líquido condensado del proceso se somete

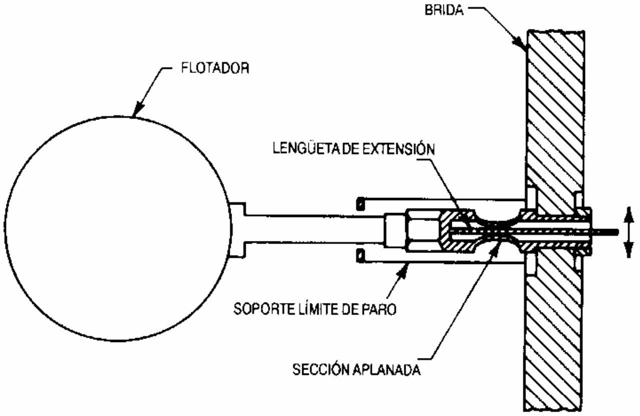


FIG. 22-80 Unidad de desplazador con tubo de flexión.

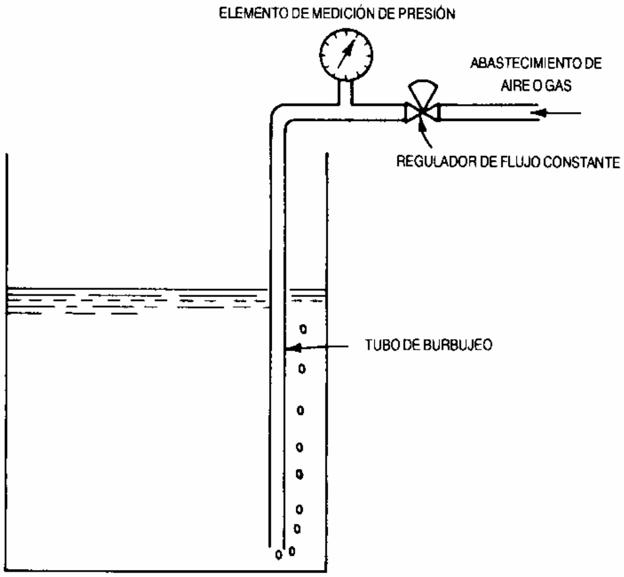


FIG. 22-81 Sistema de tubo de burbujeo para medir niveles.

a congelación a temperatura ambiente, se utiliza un líquido anticongelante apropiado para llenar el brazo de referencia y el recipiente del condensado.

Métodos diversos Los dispositivos y las técnicas ya descritos cubren la mayor parte de las instalaciones para medir niveles. Sin embargo, existen algunas aplicaciones para este tipo de determinaciones, en las que los problemas y las condiciones especiales prevalecientes hacen que estos métodos sean inadecuados. Estos problemas especiales han dado origen a una variedad de técnicas y dispositivos basados en las características del fluido que no sean la densidad. Algunas condiciones que requieren técnicas especiales son: una diferencia muy pequeña de densidad entre los dos fluidos, por ejemplo, una entrecara líquido-líquido y un líquido en ebullición cerca de su presión crítica; fluidos extremadamente corrosivos; sólidos granulados que no manifiestan características de los fluidos reales, y fluidos que son miscibles en un grado limitado, por lo cual dan una entrecara poco definida.

Métodos eléctricos Hay dos características eléctricas de los fluidos, la conductividad y la constante dieléctrica, que se utilizan con frecuencia para distinguir entre dos fases, para fines de medición del nivel.

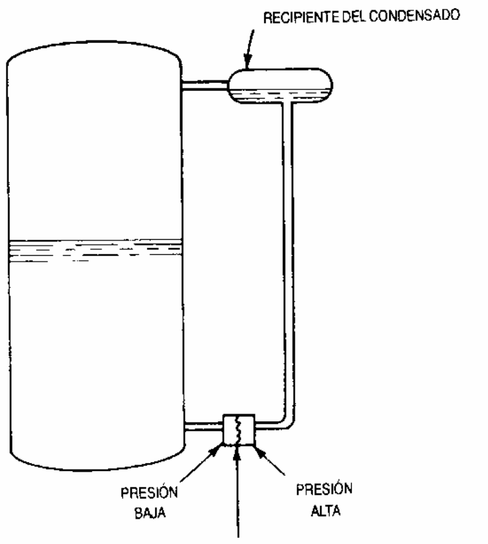


FIG. 22-82 Sistema hidrostático de medición de niveles que se utiliza en sistemas de líquidos en ebullición.

Una aplicación de la conductividad eléctrica es la detección de nivel a punto fijo de un líquido conductivo, por ejemplo, niveles elevados y bajos de agua. Se aplica un voltaje entre dos electrodos insertados en el interior del depósito, a distintos niveles. Cuando los dos electrodos están sumergidos en el líquido, fluye una corriente.

Las mediciones de nivel basadas en la capacitancia se fundamentan en el hecho de que la capacidad eléctrica entre dos electrodos varía en función de la constante dieléctrica del material que los separa. Un ejemplo usual de sistema continuo de medición de nivel consiste en un electrodo de varilla colocado verticalmente dentro de un depósito, mientras que la pared metálica del mismo actúa como el otro electrodo. La capacitancia eléctrica entre los electrodos es una medida de la altura de la entrecara a lo largo de la varilla del electrodo. Por lo común, la varilla se aísla conductivamente de los fluidos de proceso por medio de un recubrimiento de plástico.

La constante dieléctrica de casi todos los líquidos y sólidos es notablemente mayor que la de los gases y vapores. La constante dieléctrica del agua y otros líquidos polares es también superior a la de los hidrocarburos y otros líquidos no polares.

Métodos térmicos Los sistemas de medición de niveles se pueden basar en la diferencia de las características térmicas entre los fluidos, como la temperatura o la conductividad térmica.

El empleo de la diferencia de temperatura para medir niveles se ilustra por medio del dispositivo de uso muy frecuente que sirve para controlar el nivel de agua en tambores de caldera. Este dispositivo consta de dos tubos metálicos concéntricos que tienen distintos coeficientes de expansión térmica, en donde los extremos del tubo exterior se conectan a los espacios de líquido y vapor del tambor. El vapor que está dentro del tubo se mantiene a la misma temperatura que el del tambor, mientras que el agua del tubo se enfría debido a la transmisión de calor a la atmósfera. El movimiento del tubo interior en relación con el exterior, debido a la expansión diferencial, se transmite por medio de un sistema articulado para activar la válvula de control del agua de alimentación.

Los sensores de nivel de punto fijo basados en la diferencia de conductividad térmica entre dos fluidos constan de una termorresistencia calentada eléctricamente y que se inserta dentro del depósito. La temperatura de la termorresistencia y, en consecuencia, su resistencia eléctrica, aumenta al disminuir la conductividad térmica del fluido en el que está sumergida. Puesto que la conductividad térmica de los líquidos es notablemente superior a la de los vapores, este dispositivo se utiliza como detector del punto de nivel para entrecaras líquido vapor.

Consistencia y viscosidad La detección de la entrecara basada en la diferencia entre la consistencia de los dos fluidos es, a menudo, la base para medir el nivel de sólidos granulares o semisólidos.

Un sensor de punto de nivel para sólidos granulares, basado en la consistencia de la fase sólida, consta de una paleta que gira con baja velocidad (de 5 a 10 rpm), por medio de un motor eléctrico que utiliza un resorte de tensión o cualquier mecanismo similar. La paleta tendrá libertad de rotación si no está en contacto con el material sólido. Cuando el nivel del material sólido se eleva hasta la ubicación de la paleta, ésta deja de girar. El motor sigue funcionando hasta que la deflexión del resorte activa un interruptor de límite que apaga al motor y activa una alarma o un control externo. Cuando el nivel desciende dejando en libertad a la paleta, el resorte retorna a su posición original y el motor se vuelve a poner en marcha.

También existe un dispositivo similar al medidor de nivel de flotador y cinta, que sirve para medir el nivel de sólidos granulados. Dicho aparato consta de un peso suspendido por medio de una cinta dentro del depósito. Cuando se desea medir un nivel, se deja que el peso descienda dentro del depósito por medio de un embrague de deslizamiento en la polea de la cinta. Cuando el peso llega al nivel del sólido, el interruptor detecta la laxitud de la cinta, y el peso se extrae por medio de un motor eléctrico. Los métodos indicadores para esta clase de dispositivos son similares a los que se emplean en los aparatos comunes de flotador y cinta.

Métodos sónicos También existe un detector de nivel de punto fijo basado en las características de la propagación sónica, para detectar una entrecara líquido-vapor. Este medidor emplea un transmisor y un receptor piezoeléctricos, separados por una abertura corta. Cuando dicha abertura se llena con líquido, se transmite energía ultrasónica a través de la misma, y el receptor activa un relevador. Cuando la abertura se llena con un vapor, la transmisión de la energía ultrasónica es insuficiente para activar el receptor.

Otra técnica sónica que se ha utilizado para medir niveles es el dispositivo de sonar, que requiere una entrecara bien definida entre dos fluidos. Un cristal de transmisión genera una onda sonora pulsátil que se refleja en la entrecara de los fluidos y retorna al cristal receptor. El nivel se mide en función del tiempo necesario para que el pulso de sonido se desplace del transmisor a la entrecara y retorne al receptor. El transmisor-receptor se puede colocar ya sea debajo o arriba de la entrecara, cuando la transmisión se realiza en la fase líquida o de vapor, respectivamente.

MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

Estas mediciones se consideran a veces como analizadoras de composición porque, para mezclas binarias o seudobinarias, la composición se infiere con frecuencia de la medición de las propiedades físicas.

Densidad y densidad relativa (gravedad específica) En el caso de mezclas binarias o seudobinarias de líquidos o gases, o de una solución de un sólido o gas contenidos en un disolvente, la densidad es una función de la composición a cierta temperatura y presión. En el caso de soluciones no ideales, la calibración empírica dará la relación entre la densidad y la composición.

Columna de líquido La densidad se determina midiendo la presión manométrica en la base de una columna de líquido de determinada altura, abierta a la atmósfera. Si el sistema de proceso es cerrado, entonces la medición de la presión diferencial se toma entre la base de la columna de líquido de una altura fija y la columna de vapor que queda sobre ella. Si no siempre se tiene un espacio de vapor presente, la medición de presión diferencial se lleva a cabo

:n técnicas especia-
:sidad entre los dos
íquido y un líquido
dos extremadamen-
ıifiestan caracterís-
niscibles en un gra-
ıco definida.
:ctricas de los fluidos,
:utilizan con frecuen-
nedición del nivel.

entre la base y la parte superior de la columna de altura fija, tomando la medición superior en un punto que quede debajo de la superficie del líquido.

Desplazamiento Existen muchos dispositivos para medir la densidad, basados en las técnicas de desplazamiento.

Un hidrómetro es un dispositivo de peso constante e inmersión variable. Cuando el peso del hidrómetro es igual que el peso del líquido desplazado, el grado de inmersión es una medida de la densidad. El hidrómetro se adapta tanto a aplicaciones manuales como automáticas.

Un flotador de desplazamiento consiste en un flotador totalmente sumergido, en donde la flotabilidad del líquido se puede medir por medio de la posición del flotador, como se indica en la figura 22-83. La posición del flotador varía con el peso de la cadena sostenida por la fuerza de flotabilidad que actúa sobre el flotador. Otro dispositivo similar mide, por medio de un tubo de torsión, la fuerza que se ejerce en un flotador totalmente sumergido.

Otra modificación incluye un flotador magnético suspendido debajo de un solenoide, en donde el campo magnético variable mantiene el flotador a una distancia constante de dicho solenoide. La alteración de la posición del flotador, generada por un cambio de densidad, excita a un sistema eléctrico que aumenta o reduce la corriente que pasa por el solenoide.

Medición directa de la masa En la figura 22-84 se ilustra un dispositivo de esta índole, que hace que un tubo en U vibre en un plano perpendicular al plano del papel. La amplitud de la vibración se mide para indicar los cambios de densidad. La amplitud disminuye con la densidad.

Peso de un volumen fijo Hay varios dispositivos que utilizan mecanismos de equilibrio de fuerzas (véase la Fig. 22-85) para medir el peso de una cámara o un tubo de volumen fijo. La cámara o el tubo van unidos a la fuente de la muestra y se descargan por medio de acoplamientos flexibles, como, por ejemplo, fuelles.

Medidores de densidad de radiación La radiación gamma puede servir para medir la densidad de materiales dentro de la tubería o el depósito de proceso. El equipo es básicamente el mismo que se emplea para medir niveles, excepto que, en este caso, el tubo o el depósito se deben llenar por encima del volumen eficaz de la muestra irradiada. La fuente se monta a un lado de la tubería o el depósito mientras que el detector va en el otro lado, cuidando de proporcionar la protección de seguridad necesaria contra la radiación en torno a la instalación. Generalmente se utiliza cesio 137 como fuente de radiación para longitudes de trayectoria menores que 610 mm (24

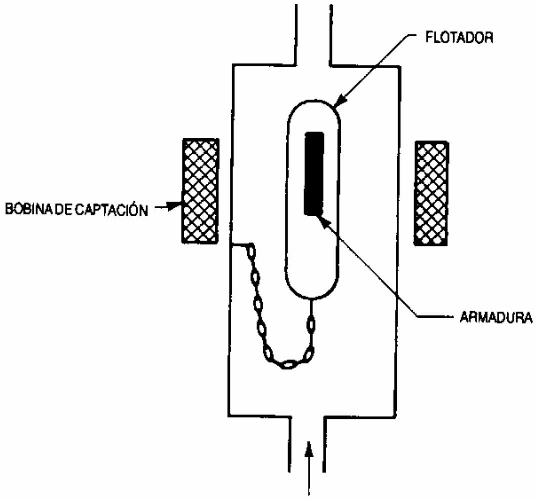


FIG. 22-83 Medidor de densidad de cadena balanceada en el cual la posición del flotador se determina mediante el peso de cadena requerido para equilibrar la fuerza de flotación.

Universidad de Carabobo
Biblioteca
Facultad de Ingeniería

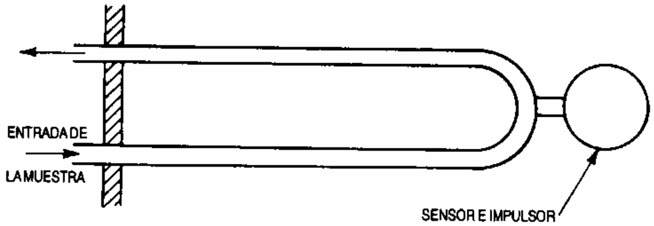


FIG. 22-84 Detector de densidad de tubo en V vibrante, en el cual la vibración es perpendicular al plano del papel.

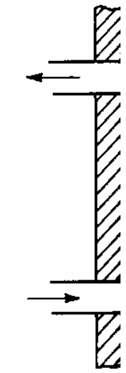


FIG. 22-85 D
continuo.

in), y cobalto
lo común, el d
radiación ga
trayectoria d
depósito, se
las correccio
intensidad d
Sensor del
sitivo consta
una rueda sir
como se obse
de desviador
por el arrastr
densidad del
inducido por
do que gira e
sión es la can
Viscosidad
lo común ya s
producido por
instalación se
dades, y la cal
tanto newtoni
Equipos (h
disponibles qu

ente que pasa por el

34 se ilustra un dis-
J vibre en un plano
la vibración se mi-
itud disminuye con

os que utilizan me-
22-85) para medir
La cámara o el tubo
rgan por medio de
lles.
ción gamma puede
to de la tubería o el
l mismo que se em-
), el tubo o el depó-
icaz de la muestra
bería o el depósito
do de proporcionar
idiación en torno a
37 como fuente de
s que 610 mm (24

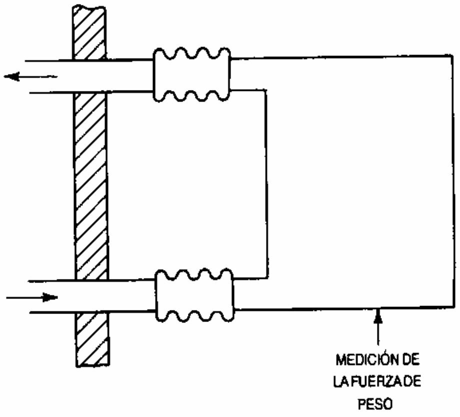


FIG. 22-85 Determinación de la densidad de un fluido mediante un pesaje continuo.

in), y cobalto 60 para más de 610 mm (24 in) de desplazamiento. Por lo común, el detector es un medidor de ionización. La absorción de la radiación gamma es una función de la densidad y, puesto que la trayectoria de absorción incluye las paredes de la tubería o el depósito, se emplea una calibración empírica. Es preciso hacer las correcciones apropiadas para tomar en cuenta la pérdida de intensidad de la fuente con el paso del tiempo.

Sensor del arrastre viscoso y la densidad del gas Este dispositivo consta de un propulsor de paletas movido por un motor, y una rueda similar de impulso estacionario que se coloca cerca, como se observa en la figura 22-86. Estas ruedas se sitúan dentro de desviadores cilíndricos coaxiales. El par de torsión impartido por el arrastre viscoso a la rueda de impulso es una medida de la densidad del gas. Este par de torsión es comparado con el par inducido por el aire u otro gas estándar sobre un sensor duplicado que gira en dirección opuesta. La diferencia en el par de torsión es la cantidad medida.

Viscosidad y consistencia Los viscosímetros continuos miden por lo común ya sea la resistencia al flujo o el arrastre o el par de torsión producido por el movimiento de un elemento a través del fluido. Cada instalación se aplica normalmente en un intervalo angosto de viscosidades, y la calibración empírica en dicha gama permite utilizar fluidos tanto newtonianos como no newtonianos.

Equipos (***hardware***) Existen muchas configuraciones de equipos disponibles que se clasifican en cuatro categorías generales:

1. *Tipo rotatorio* Este tipo mide el par resultante de la rotación de un árbol o eje dentro de una cámara de muestra, a través de la cual fluye continuamente la muestra.

2. *Tipo flotador o pistón* El tipo flotador mide la posición de un flotador de forma especial, que va dentro de un tubo ahusado por el que fluye la muestra a velocidad constante. Este equipo es similar a los rotámetros que sirven para medir los flujos.

El tipo pistón mide el tiempo que requiere un pistón o una bola para caer a través de una muestra estática de fluido contenida en un cilindro ligeramente mayor que el pistón o la bola.

3. *Tipo sonda o terminal vibrante* Este tipo mide la amplitud de vibración de una sonda o terminal sumergida en el fluido. La sonda se excita eléctricamente a una frecuencia constante. Otro método de excitación es aplicar pulsos a la sonda a una velocidad determinada por el índice de disminución en la amplitud de la vibración. En este caso, la frecuencia de pulsación es la variable medida.

4. *Tipo capilar* Esta clase mide la caída de presión generada por el flujo constante del fluido por un tubo capilar de diámetro y longitud específicos.

Analizadores del índice de refracción Cuando la luz se mueve a través de un medio (p. ej., aire o vidrio) para pasar a otro (p. ej., un líquido), sufre un cambio de velocidad y, si el ángulo de incidencia no es de 90°, sufre también un cambio de dirección. Para una entrecara, un ángulo, una temperatura y una longitud de onda de luz particulares, la cantidad de desviación o refracción dependerá de la composición del líquido.

Si la muestra es transparente, el método normal consiste en medir la refracción de la luz transmitida a través de la entrecara vidrio-muestra. Si la muestra es opaca, lo que se mide es la reflectancia cercana al ángulo crítico en la entrecara vidrio-muestra.

Tipo transmisión La mayor parte de los instrumentos de proceso de esta naturaleza operan basándose en un principio de nulificación. El desplazamiento de refracción de la luz que atraviesa el prisma lleno de muestra se mide haciendo girar un placa de vidrio siguiendo la trayectoria óptica. La placa de vidrio o "bloque de refracción" forma parte de un servosistema, que mantiene en forma automática el haz de luz de medición centrado sobre un detector de fototubo. El ángulo de rotación de la placa es la cantidad medida. En algunos casos, se puede tomar una medición diferencial del índice de refracción entre un prisma que lleva un fluido de referencia y otro más que porta la muestra de que se trata. Para lograr mediciones precisas, es necesario controlar muy bien la temperatura de la muestra.

Tipo reflectancia En esta clase de dispositivo, el ángulo promedio de incidencia del haz de luz sobre la entrecara vidrio-muestra, se dispone de tal manera que quede dentro de la gama de ángulos críticos con los cuales se va a asociar la muestra. La luz que es incidente a ángulos mayores que el crítico, se reflejará si el índice del vidrio es mayor que el índice de la muestra. La luz incidente a ángulos menores que el crí-

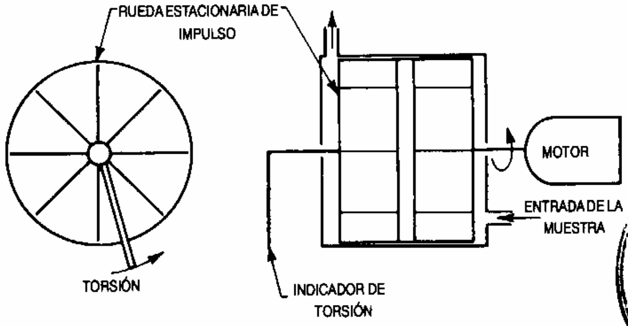


FIG. 22-86 Medidor de densidad de un gas por medio del arrastre viscoso.

de Carabobo
BIBLIOTECA
Facultad de Ingeniería
010610

tico se reflejará sólo en parte, según el ángulo de incidencia. La luz no reflejada se absorberá en la muestra opaca.

Conductividad térmica Todos los gases y vapores tienen la capacidad de conducir calor desde una fuente calorífica. A una temperatura y un ambiente físico dados, las pérdidas de calor por radiación y convección se estabilizarán y la temperatura de la fuente calorífica dependerá primordialmente de la conductividad térmica y, por ende, de la composición de los gases circundantes.

Celda de muestra Los analizadores de conductividad térmica consisten normalmente en una celda de muestra y otra de referencia, cada una de las cuales contiene una fuente de calor combinada con un detector. Por lo común, estas celdas se conservan dentro de un bloque metálico con dos pequeñas cavidades en las que se montan los detectores. La muestra fluye por la cavidad de la celda de muestra atravesando el detector. La celda de referencia tiene una cavidad idéntica y cuenta con un detector por el cual fluye un gas conocido.

Detectores de fuente calorífica Por lo común, la combinación de fuente calorífica y detector se compone de filamentos de alambre o termorresistencia calentadas por una corriente constante. Puesto que su resistencia es una función de la temperatura, la resistencia del detector de la muestra variará con la composición de la misma, mientras que la resistencia del detector de referencia se mantendrá constante. La salida del puente del detector será una función de la composición de la muestra.

Analizadores del punto de ebullición Los analizadores de proceso para obtener diversos puntos de ebullición (inicial, intermedio y final) de corrientes de hidrocarburos, son bastante conocidos. Estos analizadores son procesos de destilación en miniatura en los que la temperatura de la muestra se mide al efectuarse la destilación. Los diferentes diseños se deben a distintos métodos que se emplean para determinar la cantidad de muestra destilada, tomando en cuenta de si se trata de una medición en lotes o continua.

Analizadores del punto de inflamación (Flash point) En este tipo de analizadores, la muestra de líquido se calienta, su vapor se mezcla con una corriente controlada de aire y se alimenta a una cámara de chispa. Al aumentar la temperatura de la muestra líquida, y con ello la concentración de vapor, la mezcla se enciende finalmente por medio de una chispa. La temperatura de la muestra en este punto se registra entonces como punto de inflamación.

ANALIZADORES DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PROCESO

Varios analizadores de composición que se emplean para verificar y controlar un proceso requieren la conversión química de uno o más componentes de la muestra, antes de efectuar la medición cuantitativa. Estas reacciones incluyen la formación de sólidos suspendidos para mediciones turbidimétricas, la formación de materiales coloreados para la detección colorimétrica, la oxidación o la reducción selectiva para mediciones electroquímicas y la formación de electrólitos para mediciones basadas en la conductancia eléctrica. Algunos materiales no volátiles se pueden separar y medir por cromatografía de gas, después de convertirlos en derivados volátiles.

Analizadores cromatográficos Los analizadores cromatográficos se emplean bastante para separar y medir compuestos volátiles y compuestos que se pueden convertir cuantitativamente en derivados volátiles. Estos materiales se separan colocando una porción de la muestra en una columna cromatográfica y transportando los compuestos por la misma por medio de una corriente de gas. Como resultado de las afinidades diferentes de los componentes de la muestra por el relleno de la columna, los compuestos emergen sucesivamente como mezclas binarias con el gas portador. En la salida de la columna se tiene un detector que mide alguna propiedad física que se pueda correlacionar con la concentración de los compuestos contenidos en el gas portador. Tanto la concentración de altura máxima o de pico como la integral de pico altura-tiempo, es decir, el área de pico, se puede relacionar con la concentración del compuesto de la muestra original.

Los cromatógrafos de proceso tienen tres características:

1. La capacidad de efectuar análisis de múltiples componentes que van desde uno o dos de una muestra seleccionada hasta análisis de composición completos.

2. La operación cíclica con información sobre la composición, presentada en una base discontinua (datos muestreados), lo que requiere un programador para controlar las funciones del analizador y la presentación de los datos.

3. El retraso o demora del análisis instrumental (además del retraso de la muestra) determinado por el grado al que los parámetros de columna como longitud, material de relleno, eficiencia, velocidad de flujo y temperatura se han optimizado para lograr un tiempo de análisis mínimo.

Lo completo que resulta el análisis por medio de las técnicas cromatográficas, hace posible el cálculo de propiedades físicas de la muestra en casos en que es inconveniente o demasiado laborioso medir la propiedad en forma directa, por ejemplo, en la determinación del número de octanaje de una gasolina.

Columnas Las columnas cromatográficas se dividen en dos clases generales: las rellenas o empaquetadas y las tubulares abiertas con un revestimiento de pared. Las primeras de ellas contienen, por lo común, un adsorbente granular o un material de sostén granulado recubierto con una capa muy delgada de disolvente con un alto punto de ebullición (líquido de separación). Las columnas tubulares abiertas contienen una película delgada de líquido de separación en sus paredes, y cuentan con un pasaje abierto para el gas que va por el centro de la columna.

Existe una amplísima variedad de adsorbentes y líquido de separación disponibles para columnas cromatográficas. Para cromatógrafos de proceso, la selección del relleno de la columna más apropiado para cada separación específica es uno de los factores más importantes para obtener el tiempo de análisis más breve posible para lograr un control automático del proceso.

Detectores Los dos detectores que se emplean con mayor frecuencia para los cromatógrafos de proceso son el detector de conductividad térmica (catarómetro) y el detector de ionización a la llama de hidrógeno. Los detectores de conductividad térmica, que se vieron con anterioridad, deben calibrarse todas las veces que se busca la respuesta térmica de cada compuesto.

Los detectores de ionización a la llama de hidrógeno son más complicados que los de conductividad térmica, pero son capaces de sensibilidades de 100 a 10 000 veces mayores en el caso de hidrocarburos y compuestos orgánicos. Para la detección ultrasensible de impurezas a nivel de trazas, los gases portadores se deben purificar de manera especial.

Programación La naturaleza cíclica de los cromatógrafos de proceso requiere un dispositivo para la adición controlada de la muestra, columnas de conmutación, señales de pico de compuertas y niveles de señal de medida. Estas funciones se obtienen por medio de un programador mecánico o electrónico, o bien mediante una computadora digital. Con frecuencia se suministran circuitos electrónicos para funciones adicionales, como la medición de alturas de pico o áreas de pico, y para el cálculo de razones de concentración de la muestra.

La computadora digital se puede utilizar para programar las funciones de uno o más cromatógrafos y calcular las concentraciones. La combinación más compleja de cromatógrafos y computadoras permite cálculos en línea, como combinar análisis parciales de varias columnas cromatográficas en un análisis total, sacando una resolución matemática de los picos no separados y computando las propiedades físicas de la corriente de la muestra.

Presentación de datos y control del proceso Para regular un proceso, casi siempre se considera adecuado presentar las concentraciones del componente en forma de gráfica de barras en un registrador de gráfica en tira, o bien, en forma digital.

Cuando el retraso del analizador (retraso de la muestra más retraso del análisis), es una fracción pequeña de la constante de tiempo del proceso, la salida de un cromatógrafo de proceso puede utilizarse como la variable medida en el control automático de circuito cerrado de un proceso. Se dispone de cambios en la señal de control sólo una vez

por ciclo de analizador, y esta señal de control se debe mantener constante hasta que se disponga de una nueva señal de salida del analizador.

Cuando el retraso del analizador sea prolongado en comparación con la constante de tiempo del proceso, la salida del cromatógrafo se puede utilizar para ajustar automáticamente el punto de referencia en un controlador primario en un circuito de cascada, o para actualizar el valor de una variable computada.

Análisis de trazas Los cromatógrafos de gas son muy útiles para medir las concentraciones de trazas de materiales volátiles. El detector de ionización a la llama de hidrógeno es extraordinariamente sensible a casi todos los materiales orgánicos. Hay formas especiales de estos detectores que se sensibilizan a compuestos que contienen halógenos, y se utilizan para medir concentraciones de trazas de estos componentes en presencia de cantidades sustanciales de hidrocarburos y otros de índole orgánica que no contienen halógenos. Existen otras clases de detectores de ionización que son muy sensibles a los materiales no orgánicos.

Analizadores del infrarrojo Muchos compuestos gaseosos y líquidos absorben, hasta cierto grado, radiación en el infrarrojo. El grado de absorción a longitudes de onda específicas depende de la estructura molecular y la concentración.

Los instrumentos de procesos son por lo común del tipo no dispersivo, es decir, el detector se expone a una banda ancha de longitudes de onda de radiación. Esto contrasta con el instrumento de laboratorio normal que utiliza un monocromador de exploración para aislar bandas angostas de longitudes de onda sucesivas. Los principales componentes de un instrumento de proceso son la fuente de radiación, la celda de muestra y el detector.

Fuente de radiación En general, se trata de un alambre calentado que emite radiación sobre una porción analíticamente útil del espectro del infrarrojo, es decir, 1 a 10 μm. El requisito primordial es la estabilidad de emisión y en ocasiones se emplean fuentes duales.

Celda de muestra Esta varía de unos cuantos milímetros a 1 metro o más de longitud, según que la muestra sea un líquido o un gas con escasa capacidad de absorción.

Detectores Hay dos tipos comunes de detector para analizadores no dispersivos. Estos analizadores tienen usualmente dos haces de radiación, uno de análisis y el otro de referencia. Un tipo de detector consta de dos celdas llenas de gas separadas por un diafragma. Conforme la cantidad de la energía infrarroja absorbida por el gas deflector en una de las celdas comienza a cambiar, la presión de la celda variará. Esto produce un movimiento del diafragma que, a su vez, genera un cambio en la capacitancia entre el diafragma y el electrodo de referencia. Este cambio de capacitancia eléctrica se mide como la salida. El segundo tipo de detector consiste en dos termopilas o dos bolómetros, uno en cada uno de los dos rayos o haces de radiación. La radiación infrarroja absorbida por el detector se mide por medio de una salida diferencial de termopar o un circuito de puente de termómetro de resistencia (bolómetro).

Con los detectores llenos de gas, se suele utilizar un sistema de luz interrumpida, en el cual uno de los lados del detector capta la fuente a través del haz analizador, y el otro lado, el haz de referencia, alternándose entre sí con una frecuencia de unos cuantos hertz.

Analizadores del ultravioleta y de radiación visible Muchos compuestos gaseosos y líquidos absorben radiación en la región ultravioleta cercana o visible. Por ejemplo, los compuestos orgánicos que contienen grupos estructurales aromático y carbonilo, manifiestan una buena absorción en la región ultravioleta. Asimismo, muchas sales y muchos gases inorgánicos absorben en la región ultravioleta o visible. En contraste, los hidrocarburos de cadena recta y los saturados, los gases inertes, el aire y el vapor de agua son fundamentalmente transparentes.

Los analizadores de proceso se diseñan para medir la absorbancia en una banda de longitudes de onda en particular. La banda deseada se aísla normalmente por medio de filtros ópticos y cuando la absorbancia se encuentra en la región visible, se utiliza el término "colorimetría".

Los principales componentes de un instrumento de proceso son la fuente lumínica, la celda de muestra y el detector. Hay dos configuraciones comunes que se emplean en estos instrumentos. En una de ellas, la luz de una sola fuente se divide en dos haces por medio de un sistema de espejo. Uno de los haces atraviesa la celda de muestra y el segundo la de referencia. Los haces se comparan, entonces, utilizando uno o dos detectores. La segunda configuración es similar, excepto que el haz se divide después de atravesar la celda de muestra. En este caso, uno de los haces se insensibiliza al compuesto de la muestra de interés, por medio de algún tipo de filtrado. En cualquiera de los dos casos, el haz de luz puede interrumpirse o no en forma mecánica para producir una entrada de ca al detector.

Fuente lumínica Por lo común, la fuente más usual es la lámpara de tungsteno, aunque también se emplea a menudo la de mercurio. El principal requisito es una emisión fuerte y estable en la región de longitud de onda de interés.

Detectores El detector de uso normal es el fototubo o fotobulbo. Se acostumbra utilizar filtros ópticos apropiados para limitar la energía que llega al detector, para asegurar el nivel deseado, y a la región de longitud de onda conveniente. Puesto que la absorción realizada por la muestra es logarítmica si se emplea la región de longitud de onda lo suficientemente angosta, a veces se emplea un amplificador exponencial para compensar y producir una salida lineal.

Turbidimetría La turbidimetría es, en cierto modo, una extensión de la colorimetría, en el sentido de que se refiere a la absorción o la dispersión de la luz visible, por lo que se emplea el mismo equipo. Las bandas anchas de longitudes de onda son casi siempre adecuadas, ya que los materiales macroparticulados se absorben o dispersan en toda la región visible. Con frecuencia, la dispersión se mide a cerca de 180° en relación con la luz incidente.

Paramagnetismo Unos cuantos gases, incluyendo O_2, NO y NO_2, exhiben propiedades paramagnéticas como resultado de sus electrones desapareados. En un campo magnético no uniforme, los gases paramagnéticos tienden a moverse hacia la parte más fuerte del campo debido a su susceptibilidad magnética, desplazando con ello los gases diamagnéticos. La susceptibilidad paramagnética de estos gases disminuye con la temperatura. Estos efectos permiten medir la concentración del gas paramagnético más fuerte, el oxígeno.

Nefelometría La nefelometría se diferencia de la colorimetría en que se refiere a mediciones de luz reflejada o dispersa por partículas suspendidas en la muestra, en tanto que la colorimetría (y la turbidimetría) se asocian con mediciones de luz transmitida a través de la muestra. Los nefelómetros son similares a los colorímetros y los turbidímetros, en lo que se refiere a los requisitos de la fuente de luz, la celda de muestra y el detector. Algunos colorímetros de proceso se diseñan para convertirse sin grandes problemas en nefelómetros. Normalmente la luz reflejada o dispersa se mide por medio de una fotocelda colocada en un ángulo de 90° en relación con el haz de luz transmitida.

INSTRUMENTOS ELECTROANALÍTICOS

Análisis conductimétrico Las soluciones de electrólitos en disolventes ionizantes, por ejemplo el agua, conducen una corriente cuando se aplica un potencial eléctrico a los electrodos sumergidos en la solución. La conductancia es una función de las concentraciones iónicas, la carga iónica y la movilidad de los iones.

Las mediciones de conductancia son idealmente adecuadas para determinar la concentración de un solo electrólito fuerte en soluciones diluidas. A concentraciones mayores, la conductancia se hace una función compleja no lineal de la concentración, requiriendo entonces una calibración apropiada para mediciones cuantitativas.

El análisis de gases se efectúa comúnmente por medio de mediciones de conductancia. Los gases ácidos o reactivos disueltos en líquidos o cuantitativamente adsorbidos de corrientes de gases, y gases que se pueden oxidar o reducir producen electrólitos que es factible medir.

Los analizadores conductimétricos emplean una celda de conductividad y circuitos electrónicos de medición que constan de un oscilador de audiofrecuencia, un puente de Wheatstone de corriente alterna y un compensador electrónico para las variaciones de temperatura.

Las celdas de conductividad tienen una estructura básica simple, que consiste en dos electrodos firmemente espaciados dentro de una cámara de aislamiento, de tal manera que la impedancia medida en el alcance anticipado de concentración iónica se ubica en el intervalo de 500 a 10 000 Ω.

Mediciones conductimétricas sin electrodos Se han diseñado sistemas especiales sin electrodos para medir la conductancia. La resistencia de un circuito cerrado se mide por el grado al cual el circuito acopla dos bobinas de transformador.

Las mediciones de conductancias sin electrodos son especialmente útiles para soluciones que contienen sólidos abrasivos o fibrosos y materiales sumamente conductivos o corrosivos. Entre los ejemplos usuales se citarán el ácido fluorhídrico, el ácido sulfúrico al 98%, el nitrato de amonio fundido, la lechada de cemento y el lodo de perforación.

Análisis oscilométrico En la oscilometría, las propiedades medidas son la constante dieléctrica y la conductancia. Para la mayor parte de las mediciones, se coloca una celda que contiene la muestra entre las placas de un capacitor o dentro de una bobina. El capacitor o la bobina forman parte de una bobina resonante de radiofrecuencia. Algunos instrumentos oscilométricos tienen cabezas tensoras que se oprimen o adhieren contra la masa del material, o bien, se acercan dentro de una tolerancia reducida a una distancia especificada de la película o la tela en movimiento.

La oscilometría se emplea a menudo para medir el contenido de agua, ya que el agua tiene una constante dieléctrica de 15 a 20 veces mayor que la de la mayor parte de los materiales. Las aplicaciones usuales son la determinación de la humedad en materiales granulados, el agua en hidrocarburos y líquidos orgánicos y el contenido de agua en fibras y papel.

Análisis potenciométrico La medición de la fuerza electromotriz (fem) química es la base de varios métodos de análisis. La fem medida es la diferencia de potencial entre un electrodo sensor y un electrodo de referencia; ambos se mantienen sumergidos en una solución electrolítica. El potencial se relaciona con las actividades químicas de la solución por medio de la ecuación de Nernst. Las actividades se relacionan con las concentraciones gracias a los coeficientes de actividad.

La determinación directa de la concentración a través de las mediciones de la fem es algo inexacta a concentraciones molares superiores a aproximadamente, 10^{-4}. La precisión deficiente es resultado de que no se conocen con exactitud los coeficientes de actividad para concentraciones mayores, así como la relación logarítmica entre la fem y la actividad. No obstante, debido a la sensibilidad extrema de la respuesta del electrodo a concentraciones de trazas, esta técnica es útil para soluciones diluidas.

Se pueden determinar potenciales exactos sólo en condiciones que se acercan a una corriente cero, lo cual minimiza los errores generados por la caída del potencial resistivo y los efectos de polarización. Los circuitos de medición de voltajes son, casi siempre, de dos tipos: los potenciómetros de balance nulo con una o dos etapas de aplicación en cd o los dispositivos de resistencia de alta entrada, como los voltímetros de tubo al vacío o los electrómetros de lengüeta vibradora. Generalmente se incluye alguna forma de compensación para la temperatura.

Un potencial de referencia estable es una de las necesidades fundamentales para lograr una medición exacta. Los electrodos de referencia de empleo más común son el de calomelanos y el de cloruro de plata-plata. Los electrodos indicadores son, casi siempre, de metales nobles o de membrana. Estos últimos se emplean con mucha frecuencia para mediciones de pH y en determinaciones de iones específicos.

Mediciones de pH El electrodo de vidrio es el elemento detector primario en las mediciones de pH. Se desarrolla un potencial en la membrana de vidrio sensible al pH, como resultado de la diferencia en la actividad del ión hidrógeno en la muestra y una solución estándar contenida dentro del electrodo. Este potencial medido en relación con el potencial del electrodo de referencia proporciona un voltaje que se expresa como pH.

La instrumentación para las determinaciones de pH se encuentra entre los dispositivos de medición de procesos que se utilizan más. Con este fin se han desarrollado sistemas de electrodo resistente y circuitos electrónicos sumamente seguros.

Electrodos de iones específicos Además del electrodo de vidrio para el pH, de empleo específico para iones hidrógeno, se han desarrollado otros que son selectivos para medir diferentes iones. Esta selectividad se obtiene por medio de la composición de la membrana del electrodo (vidrio, polímero o líquido-líquido) y por la composición del electrodo. Estos electrodos están sujetos a interferencias de otros iones, y su respuesta es una función de la fuerza iónica total de la solución. No obstante, se han construido electrodos que son extraordinariamente selectivos para iones específicos, y cuando se utilizan en forma correcta, proporcionan mediciones de proceso muy valiosas.

Análisis coulombimétrico El análisis coulombimétrico se basa en la electrólisis cuantitativa exhaustiva de las especies que se miden o la generación electrolítica de un reactivo, que reacciona cuantitativamente con la especie medida. La concentración del componente medido se relaciona con la corriente total por medio de la ley de Faraday.

Los analizadores coulombimétricos de procesos tienen, casi siempre, un diseño para flujo directo continuo en el cual la corriente se determina por la cantidad de moles por segundo que entra a una celda de electrólisis. Si se conoce el gasto o velocidad de flujo, se podrá determinar la concentración.

Los componentes de instrumento requeridos incluyen la celda de electrólisis, circuitos de generación y medición de corriente y amplificadores con salida apropiada para la presentación y el control.

Las celdas de electrólisis tienen una construcción resistente y con frecuencia se pueden colocar directamente en la línea de proceso o un circuito de desviación en dicha línea. En algunas celdas, se han llegado a incorporar electrodos adicionales para controlar la corriente de electrólisis. En algunos sistemas, la generación coulombimétrica del reactivo para reaccionar con la muestra se obtiene incluyendo un electrodo de metal de base que se consume de un modo gradual.

Análisis polarográfico En el análisis polarográfico, la corriente de electrólisis es proporcional a la concentración del material electrolizado. La corriente registrada en la fase de la muestra se limita por difusión y, contrariamente a lo que sucede con el análisis coulombimétrico, sólo se electroliza una pequeña fracción del material.

Las celdas polarográficas constan de dos electrodos, uno de metal noble y el otro de metal básico que se consume con lentitud. Por lo común, el electrólito es un gel de cloruro de potasio con base de celulosa que se mantiene en su sitio y queda separado de la corriente de muestra por medio de una membrana de teflón o hule de polímeros de silicón. La muestra se difunde hacia la celda y se electroliza. Estas celdas son sensibles a la temperatura y casi siempre se construye dentro del sensor un circuito de compensación de temperatura.

MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

Las mediciones de la humedad se dividen en dos categorías generales: los métodos de humedad absoluta y los de humedad relativa. Los primeros son los que proporcionan una salida primaria que se puede calibrar directamente en términos de la temperatura del punto de condensación o rocío, la concentración molar o la concentración por peso. La pérdida de peso durante el calentamiento es el método más conocido. Los métodos más especializados analizados aparecen por orden decreciente aproximado respecto de qué tan directamente se efectúe la determinación de la humedad. Los métodos de humedad relativa son los que proporcionan una salida primaria que se calibra de un modo más directo utilizando el porcentaje de saturación de la humedad.

Método del punto de condensación o rocío Para muchas aplicaciones, el punto de condensación es la medida de humedad más conveniente. Cuando se busca la concentración, la relación entre el contenido de agua y el punto de condensación es bien conocida, y se encuentra con facilidad. El método del punto de condensación requiere una superficie inerte, cuya temperatura se pueda ajustar y medir, una corriente de gas de muestra que fluya sobre la superficie, un control para ajustar la temperatura superficial al punto de condensación y los medios necesarios para detectar la iniciación de la condensación.

:lectrodo de vidrio
:no, se han desarro-
s iones. Esta selec-
e la membrana del
la composición del
:encias de otros io-
ica total de la solu-
:e son extraordina-
:ndo se utilizan en
:so muy valiosas.
:imétrico se basa en
:s que se miden o la
ciona cuantitativa-
componente medi-
la ley de Faraday.
s tienen, casi siem-
:l la corriente se de-
entra a una celda de
:ujo, se podrá deter-

ncluyen la celda de
e corriente y ampli-
n y el control.
ión resistente y con
:nea de proceso o un
:ldas, se han llegado
la corriente de elec-
:ubimétrica del reac-
uyendo un electrodo
lual.
áfico, la corriente de
material electroliza-
:a se limita por difu-
lisis coulombimétri-
:aterial.
:rodos, uno de metal
con lentitud. Por lo
:io con base de celu-
lo de la corriente de
:ule de polímeros de
se electroliza. Estas
:re se construye den-
:nperatura.

:ategorías generales:
lad relativa. Los pri-
:ria que se puede cali-
del punto de conden-
:tración por peso. La
étodo más conocido.
:cen por orden decre-
:nte se efectúe la de-
:edad relativa son los
:bra de un modo más
la humedad.
Para muchas aplica-
e humedad más con-
lación entre el conte-
bien conocida, y se
:ondensación requie-
la ajustar y medir, una
:uperficie, un control
le condensación y los
la condensación.

Aunque la presencia del condensado se detecta eléctricamente, el método más original y frecuentemente utilizado es la detección óptica del cambio en la reflexión de luz por medio de un espejo inerte de superficie metálica. Algunos instrumentos miden la atenuación de la luz reflejada al iniciarse la condensación, en tanto que otros miden al aumento de la luz dispersada por el condensado en lugar de, o además de medir la luz reflejada. El enfriamiento de la superficie se logra con un líquido refrigerante expansible, por medio de la refrigeración mecánica tradicional o el enfriamiento termoeléctrico. La medición de la temperatura superficial se efectúa por lo común con un termopar o una termorresistencia.

La claridad con que se inicie el punto de compensación se puede reducir, o bien, es factible que se genere un desplazamiento en el punto de condensación aparente, debido a que en la muestra se encuentra un componente que se condensa a una temperatura más elevada que el intervalo de punto de condensación anticipado, por la deposición gradual de una película higroscópica de baja presión de vapor, o la deposición gradual de una película hidrofóbica de baja presión de vapor, partículas de polvo o la acumulación de rayones en la superficie del espejo. El error de la medición de la temperatura es de, aproximadamente, ± 0.56°C (1ÉF) en el intervalo de humedad más elevado; pero el error aumenta a 2.2 a 2.8°C (4 o 5°F) en el intervalo de –62 a –73°C (–80 a –100°F). En el intervalo de 0 a –18°C (32 a 0°F, aproximadamente), la deposición puede ser ya sea de gotas de líquido superenfriado o cristalitos de hielo. A puntos de condensación bajos, la capacidad del sistema de enfriamiento puede ser restrictiva.

Método de electrólisis En una celda electrolítica, el vapor de agua de una corriente de gas se absorbe cuantitativamente en una película delgada de ácido fosfórico concentrado. El agua absorbida se electroliza simultánea y cuantitativamente por medio de electrodos incrustados en la película de ácido. El gasto masa de agua que fluye a través de la celda se expresa directamente mediante la corriente electrolítica. Puesto que el empleo de este instrumento requiere la calibración de sólo el amperímetro y el medidor de flujo, y se basa en la suposición fácilmente comprobable de que la absorción y la electrólisis son cuantitativas, el método es uno de los fundamentales con que se cuenta.

Este método requiere que pase una muestra de vapor por la celda del detector; sin embargo, hay modelos que incluyen una columna separadora de gas-líquido a contracorriente, para eliminar el agua de la corriente del líquido de una manera continua, en donde el gas separador o lavador arrastra al agua hasta el detector. La eficiencia del separador se debe evaluar tomando muestras de gran solubilidad en agua o de gran viscosidad.

El método se aplica también para el contenido de humedad en sólidos. Una muestra de estos últimos se coloca manualmente en una cámara de desecación, en donde se calienta y la cámara se purga simultáneamente con un gas seco que transporta al vapor de agua al detector. La integración de la corriente de electrólisis da la cantidad de agua expulsada durante el calentamiento.

Los siguientes problemas se deben tomar en cuenta al utilizar este método:

1. No se debe aplicar en condiciones en que la corriente de gas pueda alcanzar a veces la saturación.

2. La presencia de aceite en la muestra puede recubrir eventualmente la superficie de ácido dentro de la celda.

3. El ácido fosfórico actuará como catalizador de polimerización con olefinas, creando con ello una película de aceite.

4. El electrodo de platino y el ácido fosfórico actúan de tal modo, que vuelven a producir agua con cualquier exceso de hidrógeno u oxígeno, dando mayores contenidos de salida de hidrógeno, o bien de oxígeno, en las corrientes de gas. Este efecto tiende a reducirse cuando se emplean electrodos de rodio.

5. El método no se debe utilizar con corrientes de muestra que reaccionan con la película de ácido, por ejemplo, bases y alcoholes.

El tiempo de respuesta varía inversamente con la concentración de humedad, y es menor que 1 s, en el intervalo de 100 ppm o más, unos cuantos minutos en el intervalo de 1 a 10 ppm y varias horas en el intervalo fraccionario de ppm. El intervalo de ppm raramente se utiliza sin técnicas de operación especiales.

Método de Karl Fischer Este método general de laboratorio se ha automatizado para utilizarse de manera rutinaria. Incluye una extracción de humedad, una reacción y una titulación. Las existencias tanto del extractante como del reactivo que se deben conservar tienen, por lo común, vidas de almacenamiento muy cortas.

El método se puede emplear en cualquier muestra que no reaccione con el extractante, el reactivo o el equipo de manejo, y en la cual el agua sea considerablemente menos soluble que en el extractante. Esto incluye muchos vapores, líquidos e incluso sólidos que se pueden triturar o dispersar por otras técnicas, para permitir la extracción de la humedad. El contenido de agua se calcula directamente partiendo del tamaño de la muestra y el titulador utilizado. Los volúmenes requeridos y la desecación del extractante restringen el límite inferior de detección de 5 a 10 ppm.

Método del punto de condensación o rocío (Transición de la fase salina) En un medio de humedad relativa variable, las sales higroscópicas sufren una o más transiciones de fase a humedades específicas. La transición provoca un cambio importante en la resistividad eléctrica. Los analizadores de punto de condensación basados en este fenómeno constan, por lo común, de una doble hélice de alambre en un cilindro que se recubre con una película o capa delgada de solución salina. El analizador contiene una fuente de alimentación de bajo voltaje conectada a la hélice de alambre, y algún método para medir la temperatura de la película. Durante el funcionamiento, la película húmeda de baja resistencia permite la circulación de una corriente elevada por la misma, calentándola y sacándola de esta manera hasta que se efectúa la transición. En este punto, la resistencia aumenta y con ello se reduce el calentamiento. Así, pues, el dispositivo se autorregula y mantiene la película a la temperatura requerida, a fin de hacer que el gas de la superficie conserve la humedad relativa de la transición. El cloruro de litio es la sal más utilizada. Por lo común, se emplean electrodos de metales nobles.

A cualquier temperatura de muestra dada (temperatura de bulbo seco), el intervalo del detector es desde el nivel de saturación (100% de humedad relativa) a la humedad relativa de la transición de fase (aproximadamente, 11% de la humedad relativa en el caso del cloruro de litio). El detector se restringe más aún al intervalo del punto de condensación de –46 a + 60 o 66°C (–50 a + 140 o 150°F). El método es, en esencia, independiente de la temperatura real del gas de muestra, siempre y cuando se mantenga dentro de la gama de operación.

La medición es continua, siempre cerca del equilibrio, y la capacidad calorífica del detector es más o menos baja; así, pues, la respuesta del tiempo debe ser satisfactoria para casi todas las aplicaciones. El error del método puede acercarse a 0.56°C (1°F), siempre y cuando la película salina se mantenga libre de contaminación.

Métodos analíticos generales Hay varios métodos analíticos generales, como la cromatografía de gases y líquidos, absorciones en el infrarrojo y absorción de microondas que se pueden utilizar también para efectuar análisis de humedad. Véase también "Analizadores de la composición química del proceso" y "Análisis oscilométricos."

Método piezoeléctrico Un cristal piezoeléctrico es un circuito oscilador apropiado, que oscila a una frecuencia que depende de su masa. Si el cristal tiene una película higroscópica estable en su superficie, la masa equivalente del cristal varía con la masa de agua adsorbida en la película. Por lo tanto, la frecuencia de oscilación depende del agua contenida en la película. El analizador contiene dos cristales de esta índole en circuitos osciladores igualados o compensados. Por lo común, se cuenta con válvulas que dirigen alternativamente la muestra a un cristal y un gas seco al otro, en ciclos de 30 s. Las frecuencias del oscilador de los dos circuitos se comparan electrónicamente, y la salida es la diferencia entre las dos frecuencias. En consecuencia, esta salida es representativa del contenido de humedad de la muestra. La frecuencia de salida se convierte, casi siempre, a un voltaje variable en el régimen de cc para obtener una lectura de medidor y un registro. Se proporcionan intervalos múltiples para medir niveles que van desde, aproximadamente, 1 ppm hasta cerca del nivel de saturación.

El gas seco de referencia es, de preferencia, el mismo que el de muestra, excepto por el contenido de humedad de este último. También es factible utilizar otros gases de referencia que se adsorben en forma similar al gas de muestra deseado. Por lo común, el gas seco se suministra por medio de un secador automático.

Este método requiere una muestra de vapor para el detector. La neblina que choca contra el detector altera la precisión de la medición hasta que se vaporiza o se lava de los cristales. Las gotitas de agua o la neblina pueden destruir la película higroscópica, debido a lo cual será necesario sustituir el cristal. La vaporización o los separadores gas-líquido se utilizan a veces para analizar la humedad de los líquidos.

Métodos de capacitancia Algunos analizadores aprovechan la alta constante dieléctrica del agua para detectarla en soluciones. En este caso se mide la corriente alterna que pasa por un capacitor que contiene toda o parte de la muestra entre sus placas. La selectividad y sensibilidad se incrementan aumentando la concentración de humedad dentro de la celda, para lo cual se llena la celda de muestra del capacitor con un adsorbente específico para humedad, como parte del dieléctrico. Esto no sólo incrementa el contenido de humedad, sino que también reduce la cantidad de otros componentes de la muestra que causan interferencias. El adsorbente que se emplea con mayor frecuencia es la alúmina granulada. Estos detectores se limpian y recargan con facilidad, y ofrecen una reproductibilidad satisfactoria cuando el adsorbente mismo es uniforme.

Método de calor de sorción Este analizador detecta la humedad en vapores, midiendo el calor de adsorción del agua en un desecante. Las dos celdas que contienen desecante y las termorresistencias se utilizan en una zona de temperatura constante. El analizador seca una parte de la corriente de muestra, y la muestra desecada y la de proceso se alternan directamente a través de las dos celdas en donde una de ellas deseca la corriente húmeda y la celda húmeda se deseca por acción de la corriente seca, en un ciclo de 1 a 2 min. La celda que se está desecando se enfría por desadsorción del agua, y la celda que se está humedeciendo se calienta por adsorción del agua. El puente de termorresistencia mide la diferencia de temperatura entre ambas celdas.

La elección del desecante para las celdas se determina según la compatibilidad con la muestra, que incluye impurezas, y según la sensibilidad requerida. Los intervalos normales van desde 0 a 10 ppm hasta 0 a 1000 ppm.

Aunque la duración del ciclo completo es de 2 a 4 min, el equilibrio térmico y de humedad no se alcanza sino hasta cerca de 15 min a concentraciones reducidas de ppm.

Método psicrométrico El método básico de psicrómetro giratorio compara la depresión de temperatura de un termómetro de bulbo húmedo con la temperatura ambiente o de bulbo seco. El método se ha automatizado con varias modificaciones para proporcionar lubricación y enfriamiento continuos, así como sensores de temperatura que suministren una salida eléctrica.

Método de resistencia (conductancia) Se dispone de varias clases de sensores de tipo resistivo para ser utilizados en mediciones de humedad. Estos sensores dependen normalmente de los cambios de resistencia de las superficies expuestas a la atmósfera, en donde la resistencia se mide mediante un gradiente de potencial reducido, de tal modo que el flujo de la corriente eléctrica que pasa por la superficie produce un calentamiento despreciable. Las superficies del detector pueden ser de una sal del tipo del cloruro de litio, películas de polímeros, materiales no conductores desprovistos de revestimiento, o bien, semiconductores. De hecho, cualquier resistencia de valor elevado constituye un sensor de esta naturaleza. Quizá sea preciso contar con distintas combinaciones de configuraciones de componentes de material superficial, así como mediciones de voltaje y corriente para obtener un sensor en el intervalo de humedad esperado y la sensibilidad requerida. Estos sensores son económicos en general y resistentes desde el punto de vista estructural, pero es probable que no soporten una corriente de muestra con alta velocidad o de índole abrasiva. La calibración depende usualmente de la temperatura. El índice de la respuesta de tiempo es, por lo común, lenta a temperaturas bajas, y la calibración no es estable en presencia de materiales que recubran, diluyan, que reaccionen o se disuelvan en la superficie. Estos detectores se emplean normalmente para medir humedades relativas en los gases.

SISTEMAS DE MUESTREO PARA ANALIZADORES DE PROCESO

El sistema de muestreo consiste en todos los equipos necesarios para presentar al analizador de proceso a una muestra limpia representativa de la corriente de proceso, y eliminarla posteriormente. Cuando el analizador forma una parte de un circuito de control automático, la confiabilidad del sistema de muestreo es tan importante como la del analizador o la del equipo de control.

Los sistemas de muestreo tienen varias funciones. La muestra se debe tomar del proceso, transportarse, acondicionarse, introducirse en el analizador y eliminarla después. Es probable que el problema más común en el diseño de un sistema de muestreo sea la falta de información real concerniente a las propiedades del material de proceso en el punto en que se realiza el muestreo. Otro problema frecuente es la falta de información asociada con el acondicionamiento requerido para que el analizador pueda utilizar la muestra sin fallas en el funcionamiento durante largos periodos. Algunas muestras necesitan el suficiente acondicionamiento y tratamiento para que los sistemas de muestreo se conviertan en verdaderos equivalentes de plantas de procesamiento en línea en miniatura. Estos sistemas se caracterizan por muchos de los mismos problemas de fabricación, confiabilidad y funcionamiento que caracterizan a las plantas piloto a escala pequeña, excepto que el sistema de muestreo debe operar generalmente de una manera más segura y durante periodos más prolongados.

En la figura 22-87 se ilustra el esquema de un ejemplo usual de sistema de muestreo con un analizador cromatográfico de corriente dual, de la clase que se emplea casi siempre cuando no se requiere el acondicionamiento de la muestra más allá de la regulación de presión en los puntos de muestreo (los reguladores de presión no aparecen en la figura).

Selección del punto de muestreo La selección del punto de muestreo se basa primordialmente en el abastecimiento del analizador con una muestra cuya composición o cuyas propiedades físicas sean pertinentes para que se ejecute la función de control. Otras consideraciones incluyen la selección de las ubicaciones que proporcionen muestras homogéneas representativas con la mínima demora de transporte, ubicaciones que permitan colectar un mínimo de material contaminante y que sean accesibles para los procedimientos de verificación y mantenimiento.

Toma de la muestra del proceso Hay varias consideraciones implicadas en el diseño de los dispositivos de toma de muestras, que asegurarán la obtención de muestras representativas. Por ejemplo, en una tubería horizontal que lleva un fluido de proceso, si el punto de muestreo se asigna a la base de la misma, se recogerá una cantidad máxima de moho, escamas o materiales sólidos arrastrados por el fluido. En una corriente de gas, una localización de esta naturaleza recogerá también una cantidad máxima de contaminantes líquidos. Un punto de muestreo ubicado en la parte superior de una tubería, en el caso de corrientes de líquidos, recogerá una cantidad máxima de contaminantes de vapor que arrastra la corriente. Los recodos de las tuberías que producen remolinos o generan concentraciones centrífugas de la fase más densa pueden hacer que las contaminaciones máximas se encuentren en lugares inesperados. Los materiales de procesos de dos fases son difíciles de muestrear para obtener tomas representativas de la composición total.

Un método usual para obtener una muestra del fluido de proceso a bastante distancia de las paredes del depósito o la tubería se logra mediante un tubo de educción insertado a través de un prensaestopa. Este método de muestreo toma muestras líquidas y las vaporiza para transportarlas hasta el sitio del analizador. El tiempo de retraso del transporte desde el extremo de la sonda hasta el vaporizador es mínimo, cuando se emplean tubos con volúmenes internos pequeños, en comparación con los de la tubería y la válvula.

Esta sonda
miento y rein
fabrica con n
problemas a t
dos de servici
del proceso h
válvula de co
evita la eyecci
prensaestopa.
La sección
hasta penetra
mecánica nec
Transport
que transcurr
ción en el ana
este último es
po de transpo
se debe tratar
para determin
tación o para
del tiempo de
en estado de v
Algunos a
material de la
deben ser con

; detectores se em-
s en los gases.

.DORES DE

os necesarios para
ipia representativa
ite. Cuando el ana-
omático, la confia-
omo la del analiza-

ies. La muestra se
rse, introducirse en
e el problema más
a falta de informa-
al de proceso en el
frecuente es la falta
requerido para que
el funcionamiento
sitan el suficiente
mas de muestreo se
procesamiento en
por muchos de los
y funcionamiento
eña, excepto que el
ma manera más se-

plo usual de sistema
corriente dual, de la
iere el acondiciona-
ión en los puntos de
la figura).
l punto de muestreo
analizador con una
cas sean pertinentes
deraciones incluyen
uestras homogéneas
te, ubicaciones que
nte y que sean acce-
ntenimiento.
onsideraciones im-
muestras, que ase-
Por ejemplo, en una
i el punto de mues-
a cantidad máxima
os por el fluido. En
aleza recogerá tam-
idos. Un punto de
ería, en el caso de
ima de contaminan-
de las tuberías que
ntrífugas de la fase
náximas se encuen-
ocesos de dos fases
presentativas de la

fluido de proceso a
tubería se logra me-
prensaestopa. Este
vaporiza para trans-
retraso del transpor-
res mínimo, cuando
os, en comparación

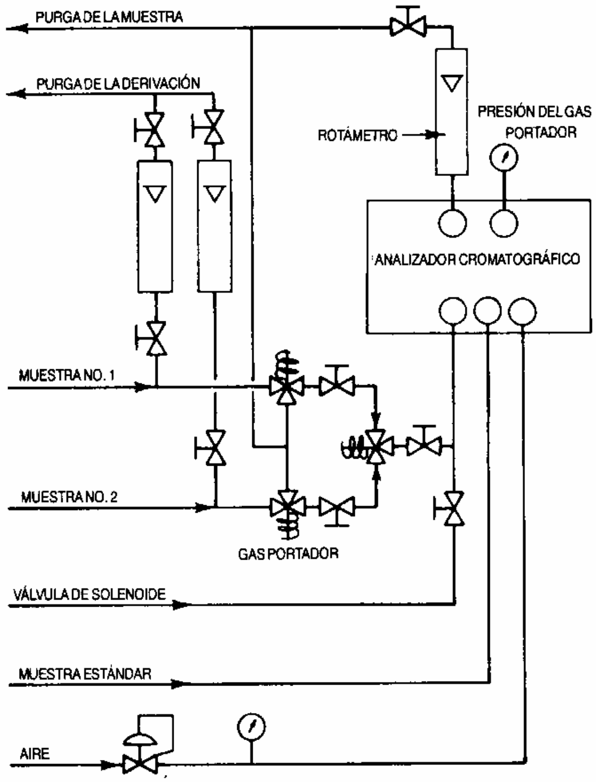


FIG. 22-87 Ejemplo sencillo de un sistema de muestreo con analizador cromatográfico de dos corrientes. Las válvulas de solenoide funcionan mediante el programador del cromatógrafo, a fin de que coincidan con el ciclo de análisis cromatográfico.

Esta sonda de muestreo se puede extraer para efectuar el mantenimiento y reinstalarla sin detener el proceso. El tubo de educción se fabrica con material que no se corroa, de manera que se deslice sin problemas a través del prensaestopa, incluso después de largos periodos de servicio. Es posible que se origine una pequeña fuga de fluido del proceso hasta que la tubería se extraiga lo suficiente para cerrar la válvula de compuerta. El casquillo estampado del extremo del tubo evita la eyección accidental del tubo de educción antes de extraerlo del prensaestopa.

La sección de la tubería que rodea al tubo de educción se extiende hasta penetrar en el depósito de proceso suministrando la protección mecánica necesaria para dicho tubo.

Transporte de la muestra El tiempo de transporte, que es el lapso que transcurre entre la toma de la muestra del proceso y su introducción en el analizador, debe reducirse a un mínimo, sobre todo cuando este último es un controlador-analizador automático. Cualquier tiempo de transporte de muestra en el circuito del controlador-analizador se debe tratar como si fuera equivalente al tiempo muerto de proceso, para determinar los ajustes normales del controlador de retroalimentación o para evaluar el funcionamiento de este último. La reducción del tiempo de transporte significa, casi siempre, transportar la muestra en estado de vapor.

Algunos aspectos que se deben tomar en cuenta al seleccionar el material de la línea de muestra son: la fuerza estructural o la protección deben ser compatibles con la zona por la cual corre la línea de muestra; el tamaño y la longitud de esta última deben ser lo suficientemente pequeños para satisfacer los requisitos del tiempo de transporte sin que se registre una caída de presión excesiva, o una desviación de muestra demasiado marcada en la entrada del analizador; el tamaño de la línea y la calidad de la superficie interna deben ser adecuados para evitar el taponamiento que llegan a producir a veces los contaminantes de la muestra; la prevención de un cambio de estado de la muestra puede requerir aislamiento, refrigeración o calentamiento de la línea de muestra, y el material de ésta debe ser tal que se reduzca al mínimo la corrosión causada por la muestra o su ambiente.

Algunas soluciones comunes para los problemas del manejo del vapor de una línea de muestra son: utilizar siempre que sea posible tubos de acero inoxidable de $^1/_8$ a $^1/_4$ de diámetro, limitar la longitud de la línea de muestra a 61 m (200 ft) o menos; emplear velocidades de corriente de muestra dentro del intervalo de 0.5 a 3.0 litros/min; restringir la temperatura de muestra cuando la línea se rastrea con vapor utilizando vapor húmedo a baja presión [menos de 376 kPa (40 lbf/in^2)] y una trampa de vapor para descargar el condensado, así como emplear un aislamiento esencialmente hermético al vapor cuando se requiere un rastreo de refrigerante.

El rastreo térmico de las líneas de muestra se logra mediante devanados en espiral de tubo de cobre en torno a la línea de muestra, antes de aplicar el aislamiento, o bien, utilizando tubos dúplex paralelos o haces de tubos apropiados. Las tuberías de plástico para líneas de muestra son satisfactorias si se toman en cuenta la composición, la

temperatura y las limitaciones de presión de la muestra, así como la naturaleza mecánica de la instalación y el ambiente de la línea.

Muestreo de varias corrientes Cuando las composiciones de la corriente de proceso en varios puntos de muestreo son similares, a veces es factible utilizar un solo analizador para todas ellas. Si el analizador se emplea para realizar un control automático, los tiempos muertos del circuito de control combinados, y los problemas de confiabilidad de los diversos circuitos coincidentes introducidos por el muestreo de varias corrientes, constituyen un factor compuesto, que es preciso tomar en cuenta. En general, las consideraciones de tiempo y confiabilidad no son tan importantes en las aplicaciones de verificación.

En la figura 22-87 se muestra el extremo del analizador de un sistema de muestreo, para verificar un analizador cromatográfico de gas. En él se tomaron precauciones para introducir una muestra de calibración para efectuar una evaluación periódica. En este caso se emplea una configuración de válvulas de solenoide de "doble bloqueo y purga", para evitar la contaminación cruzada entre las muestras. Las válvulas de solenoide se operan mediante el programador del cromatógrafo. En la ilustración se incluyen válvulas manuales de bloqueo para procedimientos de calibración y mantenimiento, así como válvulas manuales para regular la corriente. La derivación de venteo asegura que se obtenga una muestra fresca.

En la configuración de "doble bloqueo y purga", el solenoide del lado del proceso desvía cualquier fuga hacia la purga, mientras que la válvula de solenoide del lado del analizador bloquea cualquier fuga que no se haya podido purgar.

Punto de retorno de la muestra Por razones de economía o seguridad, toda o parte de la corriente de muestra se devuelve a menudo al proceso, sobre todo si se requiere una corriente desviada sustancial para minimizar el retraso en el transporte. Para evitar problemas de bombeo o presurización, la muestra se devuelve, casi siempre, a un punto de baja presión corriente abajo del punto de muestreo. Si la corriente de muestra es una fracción importante de la de proceso, su retorno en un punto de baja presión corriente arriba del punto de muestreo puede introducir efectos indeseables de tiempo o composición.

Otras técnicas para eliminar la muestra es a través del sistema de desagüe de la planta, las líneas del gas de desecho o del drenaje, según la naturaleza de la muestra. Con frecuencia, las muestras de vapor se liberan a la atmósfera. La eliminación de contaminantes separados de una muestra requiere en ocasiones un manejo especial. En todos los casos se deben observar los reglamentos de seguridad y protección contra la contaminación.

Muestra de calibración La mayor parte de los instrumentos analíticos requiere la introducción periódica de una muestra de estandarización, con el fin de recalibrar o conservar el nivel de confianza del operador en los resultados analíticos, sobre todo cuando el analizador forma parte de un equipo controlador analizador. Esta introducción periódica se puede hacer a través de una operación manual de las válvulas apropiadas, como se indica en la figura 22-87.

Si la muestra de estandarización se debe introducir automáticamente para la recalibración o estandarización automática del analizador, tanto su introducción como su manejo deben ser tan seguros como el sistema de muestreo del proceso y formar parte integrante de éste.

Acondicionamiento de la muestra El acondicionamiento de la muestra comprende por lo común la separación de contaminantes o algún otro componente dañino de la mezcla de muestra y/o el ajuste de la temperatura, la presión y la velocidad de flujo de la misma, a valores que acepte el analizador.

Algunos contaminantes más comunes que se deben eliminar son moho, escamas, productos de corrosión, depósitos provocados por reacciones químicas y alquitrán. Al muestrear algunas corrientes de proceso, el material que se va a extraer puede incluir el producto primario del proceso, por ejemplo, un polímero o bien, el constituyente principal de la corriente, por ejemplo, un aceite. En otros casos, el material que se va a eliminar está presente en cantidades de trazas, por ejemplo, agua en una muestra de cromatógrafo conectado a la línea, en donde incluso una cantidad diminuta puede dañar el relleno de la columna cromatográfica.

Se debe tener en mente que cuando los contaminantes u otros materiales que pueden impedir el análisis constituyen un gran porcentaje de la composición de la corriente, su eliminación llega a alterar notablemente la integridad de la muestra. En algunas circunstancias, la separación se debe llevar a cabo como parte de la función de análisis, de modo que el material eliminado se puede justificar. En otros casos bastará realizar la calibración adecuada de la salida del analizador.

Si se dispone de información confiable sobre la composición de la muestra, las propiedades físicas y los contaminantes presentes, se tendrá a la mano una amplia variedad de información para diseñar el equipo de acondicionamiento de la muestra. Por ejemplo, las secciones 18 a 21 de este *Manual del Ingeniero Químico* se ocupan de las técnicas de separación que es factible utilizar en el diseño de equipos de acondicionamiento de muestras.

Filtración Los elementos de empleo más común en el acondicionamiento de la muestra son los filtros. Cuando las condiciones de viscosidad, presión y arrastre de contaminación de la muestra lo permitan, se debe utilizar filtración superficial en lugar de filtración de "profundidad". Dicho de otra manera, el contaminante se recolecta en la superficie corriente arriba del filtro en lugar de que penetre en el elemento de filtración. En esta clase de filtro, un flujo importante derivado gira sobre el elemento de filtración para barrer el contaminante capturado por el filtro. Una menor corriente de muestra del analizador circula a través del elemento de filtración.

Se pueden utilizar métodos similares con medios de filtración de tipo hidrofóbico, en los cuales el agua se rechaza en forma selectiva. Al quitar agua libre de una corriente de hidrocarburos, el agua se barre de la superficie de filtración por medio de la corrien'e desviada.

En los casos en que se forma una torta de filtro en la superficie del elemento de filtración y no se pueda desalojar con eficacia por medio de la corriente desviada, es necesario proveer un flujo inverso o retrolavado de tipo periódico a través del filtro.

Separadores por inercia Algunos de los equipos de acondicionamiento más comunes que aprovechan las fuerzas de inercia para efectuar la separación son el dispositivo de flujo inverso sencillo, conocido como "depósito de extracción", los separadores de ciclón, que son más eficaces, y los de choque, en los cuales el material que se va a separar se adhiere a una superficie después de establecer contacto, y se extrae por gravedad. Los coalescedores utilizan esta última técnica.

Condensación Los condensadores y las trampas frías se emplean para separar vapores fácilmente condensables de una muestra de vapor. La temperatura baja necesaria se obtiene mediante agentes como agua de enfriamiento, fluidos fríos de proceso, refrigerantes, enfriamiento termoeléctrico o tubos de vórtice (tubo Ranque-Hilsch). En condensadores pequeños, el flujo a contracorriente de líquido y vapor puede constituir un problema.

Lavado y extracción El lavado o la extracción tienen la desventaja de introducir otro material a la muestra, que se debe separar posteriormente. En estos casos se emplean dispositivos de rociado, burbujeadores o humedecedores de pared. El lavado sirve para separar materiales que son solubles en los líquidos usados para este fin, o que reaccionan con ellos. También puede proporcionar un vehículo que separa mecánicamente materiales difíciles de manejar como alquitranes, aceites pesados o polímeros. La extracción o separación con un flujo de gas a contracorriente puede servir para eliminar los componentes volátiles de una muestra líquida. Esta última técnica se ha utilizado para muestrear niveles de agua en partes por millón en hidrocarburos líquidos, utilizando una técnica de pared húmeda modificada.

Técnicas de adsorción Hay un conjunto de técnicas relacionadas con la cromatografía y la adsorción de gases que se están haciendo cada vez más útiles. La muestra de vapor se introduce en una columna de adsorción que separa los componentes indeseables. Antes de que la columna se cargue con estos materiales indeseables, se debe someter a un lavado inverso. Es probable que estas técnicas requieran un equipo auxiliar considerable.

Un ejemplo sencillo de esta técnica, que se ha utilizado a gran escala, es el secado "sin calor". En este caso hay dos lechos adsorbentes paralelos que adsorben alternativamente el agua de una corriente de

aire a alta pres
aire de baja pr
presión del cicl
Adaptación
cas que es facti
condición de q
la eliminación
separación. Po
separación es a
que cuantitativ
Temperatur
sión y las veloc
usualmente un
Existen mucha
tamaños aprop
que requieren
miento por vaj
En los siste
siempre en fo
bles o se utilic
de flujo de tub
tivos y dan una

antes u otros mate-
gran porcentaje de
a a alterar notable-
instancias, la sepa-
ción de análisis, de
En otros casos bas-
l analizador.
composición de la
s presentes, se ten-
ara diseñar el equi-
lo, las secciones 18
pan de las técnicas
le equipos de acon-

en el acondiciona-
ndiciones de visco-
uestra lo permitan,
tración de "profun-
recolecta en la su-
netre en el elemen-
nportante derivado
ontaminante captu-
del analizador cir-

ios de filtración de
en forma selectiva.
ros, el agua se barre
n'e desviada.
en la superficie del
eficacia por medio
lujo inverso o retro-

os de acondiciona-
le inercia para efec-
o sencillo, conocido
ciclón, que son más
l que se va a separar
contacto, y se extrae
na técnica.
as frías se emplean
una muestra de va-
liante agentes como
frigerantes, enfria-
Ranque-Hilsch). En
e de líquido y vapor

tienen la desventaja
e separar posterior-
ociado, burbujeado-
a separar materiales
in, o que reaccionan
lo que separa mecá-
alquitranes, aceites
con un flujo de gas a
nponentes volátiles
utilizado para mues-
rocarburos líquidos,
da.
cnicas relacionadas
e se están haciendo
luce en una columna
bles. Antes de que la
les, se debe someter
s requieran un equi-

utilizado a gran es-
lechos adsorbentes
de una corriente de

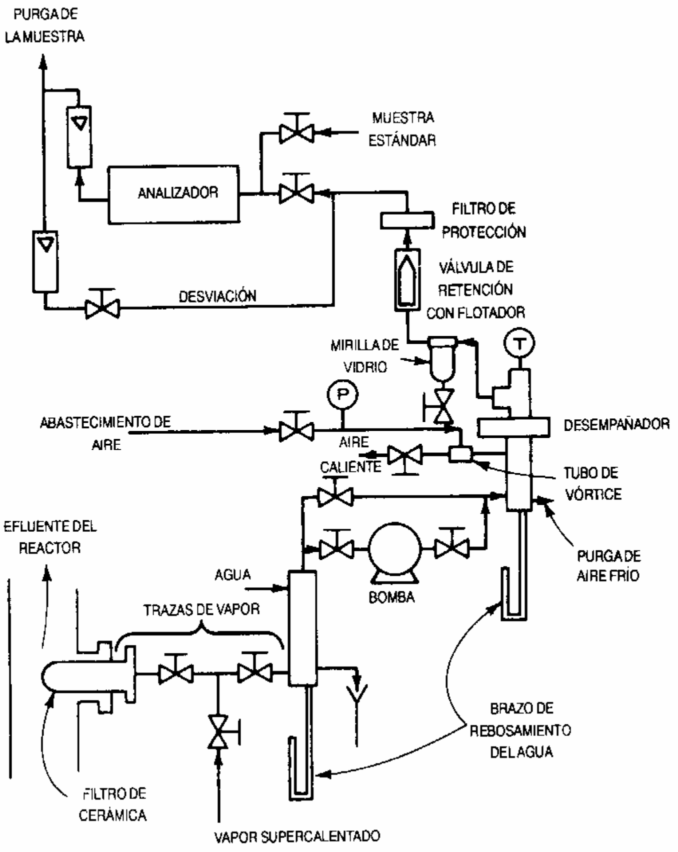


FIG. 22-88 Sistema de muestreo típico que requiere un grado moderado de acondicionamiento.

aire a alta presión, y la desadsorben mediante un lavado inverso con aire de baja presión, que ha recorrido la porción de adsorción a alta presión del ciclo.

Adaptación de los métodos analíticos Hay varias técnicas analíticas que es factible utilizar para el acondicionamiento de la muestra, a condición de que se tomen las precauciones adecuadas para asegurar la eliminación cuantitativa, la reacción, etc., o un grado adecuado de separación. Por ejemplo, la destilación se aplica cuando el grado de separación es adecuado y reproducible de un modo controlable, más que cuantitativo.

Temperatura, presión y flujo El control de la temperatura, la presión y las velocidades de flujo en los sistemas de muestreo constituyen usualmente una cuestión sencilla, cuando se pueden evitar errores. Existen muchas formas de controladores en el mercado, con diversos tamaños apropiados para sistemas de muestreo. En zonas de proceso que requieren equipos a prueba de explosiones, se prefiere el calentamiento por vapor en lugar del eléctrico.

En los sistemas de muestreo, el ajuste de la corriente se hace casi siempre en forma manual, siempre y cuando las presiones sean estables o se utilicen reguladores de presión. Por lo común, los indicadores de flujo de tubo de vidrio o rotámetros son lo suficientemente reiterativos y dan una indicación visual de la velocidad de flujo de la muestra y la contaminación. Una de las prácticas más extendidas es el empleo de controladores de flujo de presión diferencial. Para tener buenos resultados en el control de flujo de la corriente de muestra es necesario, casi siempre, tener un alto grado de separación de los contaminantes sólidos o del tipo del alquitrán.

El control de la presión no constituye un problema cuando se dispone de la suficiente presión diferencial para hacer que la muestra pase por el regulador de presión, el acondicionador de muestra y el analizador, para devolverla al sistema de proceso o al de eliminación. Los problemas comienzan a aparecer cuando la presión disponible no es la adecuada. Los reforzadores o amplificadores mecánicos de las bombas de muestreo son notoriamente problemáticos y costosos en los tamaños pequeños, por lo cual requieren materiales especiales.

Cuando es aplicable, una de las soluciones para el diferencial de presión de bajo nivel es utilizar pequeños aspiradores de aire, vapor o agua para reducir la presión en la salida de la muestra del analizador.

Ejemplo 1 En la figura 22-88 se ilustra un sistema de muestreo relativamente sencillo, diseñado para proporcionar una muestra de gas del efluente de un reactor al negro de humo para un cromatógrafo de gas. El negro de humo, el agua y los compuestos de azufre solubles en agua son los materiales que es preciso eliminar. El filtro de cerámica de poro fino se libera del negro de humo incrustado mediante un lavado inverso periódico de tipo manual, con vapor supercalentado.

El agua, los compuestos solubles de azufre y el aceite se eliminan utilizando dos etapas de intercambiadores de calor sencillos de cubierta y tubo, empleando agua y aire fríos como medios de enfriamiento. Se tiene una válvula de retención de flotador para proteger al analizador de inundaciones accidentales en caso de que fallen los rebosamientos del brazo de agua que controlan la presión de la muestra. Las mirillas de inspección proporcionan un punto de observación personal para verificar visualmente las condiciones de la muestra.

INSTRUMENTOS INDICADORES Y DE REGISTRO

La mayor parte de los instrumentos de presentación se clasifican como analógicos o digitales. La presentación analógica se caracteriza por una respuesta continuamente variable, por ejemplo, la aguja de una escala, una línea de tinta trazada en una gráfica o un rastro de luz en la pantalla de un tubo de rayos catódicos. La presentación digital se caracteriza por la información numérica que señala. Como ejemplos usuales se incluyen los voltímetros y los contadores digitales, y las hojas de registro mecanografiadas o impresas. Los datos digitales se registran también en forma codificada en cintas magnéticas o de papel.

En el caso de los dispositivos de presentación analógica, se puede indicar en una sola ojeada el valor aproximado y el valor relativo con respecto a la escala completas. Sin embargo, este tipo de dispositivo no ofrece lecturas tan rápidas y exactas como los de naturaleza digital. La presentación numérica o digital se lee con tanta precisión como se desee, y está limitada sólo por la cantidad de dígitos de que se compone cada forma de presentación particular. Las unidades de medición para la variable se pueden exhibir también junto con el valor.

El advenimiento de los sistemas de control de procesos con computadoras digitales ha estimulado el desarrollo de dispositivos indicadores y de registro de forma digital, que son funcionales y económicos. En estos sistemas de control por computadora, las técnicas de comunicación entre el hombre y la máquina tienen una orientación netamente digital. En un ejemplo usual de sistema de control por computadora digital, el operador emplea un tablero de botones para requerir las variables, cambiar los puntos de referencia, ajustar los parámetros de control del proceso y ejecutar muchas otras tareas.

REQUISITOS DE PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN SOBRE LA OPERACIÓN

Hay varios factores que se deben tomar en cuenta cuando se van a elegir instrumentos indicadores y de registro. Estos factores son exactitud, repetibilidad, confiabilidad, facilidad de lectura, resolución, velocidad de respuesta, paralaje y costo. No todos estos factores son fundamentales, aunque sí son de primordial importancia. Aunque se deben examinar los mismos factores tanto para dispositivos de presentación digital como analógica, la decisión para emplear una u otra clase de presentación se basa casi siempre en otros criterios.

Exactitud La *American Standard Definitions of Electrical Terms*, determina que: "la exactitud de un instrumento es el número o la cantidad que define su límite de error... el error es la diferencia entre el nivel indicado y el valor real de la cantidad medida". Al definir la exactitud de esta manera, se acostumbra suponer un error despreciable en la lectura del indicador y un error despreciable también en la determinación del "valor real o verdadero".

Es importante seleccionar instrumentos cuya exactitud sea adecuada: no obstante, también es importante reconocer los límites prácticos de la exactitud. La especificación de una exactitud excesiva incrementa casi siempre la inversión, reduce la confiabilidad y aumenta los costos de mantenimiento.

También es importante reconocer que la exactitud de una indicación en el tablero del cuarto de control, por ejemplo, es una exactitud compuesta del indicador, la transmisión desde la ubicación de la medición, el transductor que convierte la medición primaria en la señal transmitida y el dispositivo de medición primaria.

Repetibilidad La repetibilidad o, como se denomina a veces, la *precisión* de una medición, es muy semejante a la exactitud y con frecuencia se confunde con ella. La facilidad de repetición puede tener un mejor orden de magnitud que la exactitud absoluta; sin embargo, es imposible que ésta sea mejor que la repetibilidad. Algunos factores que afectan este aspecto son la histéresis, la banda muerta, la estabilidad y la confiabilidad. Cuando se perfeccionan estos factores, casi siempre sucede que el precio se eleva.

En muchas aplicaciones, los objetivos principales del proceso son poder repetir las condiciones de operaciones conocidas, a fin de producir artículos satisfactorios, obtener información sobre tendencias o comparar resultados en las variaciones prescritas de las condiciones de operación. Para alcanzar estos objetivos, la repetibilidad, más que la exactitud absoluta, es el criterio decisivo.

Como sucede con la exactitud, la repetibilidad de una indicación en un tablero de control es una combinación de la repetibilidad de toda la cadena de mediciones y traducciones desde el proceso al tablero del cuarto de control.

Facilidad de lectura Puesto que el objetivo de los instrumentos indicadores y de registro es presentar la información a los operadores que supervisan el proceso, la facilidad de lectura es su preocupación primordial en el momento de elegirlos. La lectura final de la presentación incluye errores de instrumentos tanto como errores humanos. Los requisitos de la facilidad de lectura dependen sobre todo de cómo se va a utilizar dicha información.

Un indicador montado en el sitio de trabajo para una variable de proceso, por ejemplo, presión, temperatura o flujo, debe tener una escala larga con caracteres muy bien marcados y visibles, así como una aguja indicadora ancha para que el operador pueda tomar la lectura a varios metros de distancia. Por lo común, los indicadores del cuarto de control tienen escalas más pequeñas y marcas más finas, debido a las limitaciones de espacio y a que se requiere mayor precisión en los mismos. Los instrumentos de prueba, como los manómetros empleados para calibrar dispositivos neumáticos, tienen carátulas circulares de diámetro grande con agujas indicadoras largas de arista delgada.

La facilidad de lectura se puede definir como el incremento de la escala más pequeña al cual se puede determinar la lectura, expresado como un porcentaje de la escala completa.

Instrumentos de escala ampliada La facilidad de lectura se incrementa utilizando un instrumento de escala ampliada (de cero suprimido). Un instrumento con un intervalo de temperaturas de 0 a 1000°, con una escala de 101.6-mm (4 in), puede tener una facilidad de lectura de 2° a 3°. Si el intervalo de temperaturas de trabajo se encuentra entre 600° y 800°, se puede utilizar un instrumento con una escala de 600° a 800°, que ofrecerá una facilidad de lectura de $^1/_2$°. La escala ampliada aumenta la facilidad de lectura, pero puede o no incrementar la exactitud o la repetibilidad. Si la exactitud útil del dispositivo de medición está limitada por la facilidad de lectura o si es una fracción fija de la escala empleada, entonces, la escala ampliada o expandida incrementará la exactitud. Por lo común, no se dispone con facilidad de verificaciones a cero sobre la exactitud en instrumentos de escala ampliada.

Indicadores digitales La facilidad de lectura de los indicadores digitales es, casi siempre, superior a la de los dispositivos analógicos, aunque no hay una forma significativa de compararlos. La facilidad de lectura de los aparatos digitales, expresada como un porcentaje de la escala completa, se determina mediante el número de dígitos presentados. La mayor parte de las indicaciones digitales utilizadas en los tableros de procesos que maneja el operador, tienen 4 dígitos y, por

tanto, la facilida
actitud de la me
dígitos utilizado
Paralaje Los
una separación
instrumento se
cara de la escal
lectura verdader
laje. El error pot
nar los instrume
muy exactas, el
aguja, en el plan
la aguja misma,
dicular de la agu
Velocidad de
de registro que
procesos relacio
factor limitante
medición mism
peratura con un
pozo térmico pa
de verificación
ras. Las propie
pozo y termopa
puesta, ante can
El tiempo de
registrador está
$^1/_4$ s. Se encuent
mecánicas y ne
dad de respuest
respuesta está li

TRANSDUCT

Por lo común, el
en un punto má
variable del pro
trador o control

rolan la presión de la
o de observación per-
stra.

nomina a veces, la
exactitud y con fre-
ción puede tener un
a; sin embargo, es
lgunos factores que
rta, la estabilidad y
tores, casi siempre

les del proceso son
cidas, a fin de pro-
sobre tendencias o
las condiciones de
bilidad, más que la

una indicación en
tibilidad de toda la
oceso al tablero del

e los instrumentos
ón a los operadores
es su preocupación
inal de la presenta-
ores humanos. Los
todo de cómo se va

ra una variable de
, debe tener una es-
ibles, así como una
tomar la lectura a
dores del cuarto de
finas, debido a las
recisión en los mis-
metros empleados
tulas circulares de
rista delgada.
l incremento de la
lectura, expresado

de lectura se incre-
a (de cero suprimi-
as de 0 a 1000°, con
ilidad de lectura de
se encuentra entre
na escala de 600° a
La escala ampliada
crementar la exact-
sitivo de medición
fracción fija de la
pandida incremen-
facilidad de verifi-
le escala ampliada.
los indicadores di-
sitivos analógicos,
los. La facilidad de
n porcentaje de la
de dígitos presen-
s utilizadas en los
en 4 dígitos y, por

tanto, la facilidad de lectura es 0.01% de la escala. No obstante, la exactitud de la medición no necesariamente aumenta con la cantidad de dígitos utilizados en la presentación.

Paralaje Los dispositivos de indicación de tipo analógico tienen una separación entre la aguja indicadora y la escala. Si la lectura del instrumento se toma en una dirección que no sea perpendicular a la cara de la escala, el indicador se verá desplazado en relación con la lectura verdadera. Este desplazamiento se conoce como error de paralaje. El error potencial de paralaje se debe tomar en cuenta al seleccionar los instrumentos y sus ubicaciones. Para obtener lecturas de escala muy exactas, el paralaje se elimina colocando un espejo detrás de la aguja, en el plano de la escala, y emparejando la imagen de la aguja con la aguja misma, a fin de obtener una observación exactamente perpendicular de la aguja sobre la escala.

Velocidad de respuesta Casi todos los instrumentos indicadores y de registro que se emplean en las industrias químicas modernas y de procesos relacionados tienen una velocidad de respuesta adecuada. El factor limitante en muchos sistemas de medición es el elemento de medición mismo. Por ejemplo, cuando se toman mediciones de temperatura con un termopar, con frecuencia, éste se coloca dentro de un pozo térmico para protegerlo del fluido de proceso y para que las tareas de verificación y sustitución de los elementos del termopar sean seguras. Las propiedades de intercambio de calor de la combinación de pozo y termopar introduce un retraso de tiempo considerable en la respuesta, ante cambios en la temperatura de proceso.

El tiempo de desplazamiento a escala completa de una pluma de registrador estándar es de 2 a 3 s y, para requisitos especiales, hasta de $^1/_4$ s. Se encuentran transductores que convierten casi todas las señales mecánicas y neumáticas en señales eléctricas, con una buena velocidad de respuesta. En instrumentos de balance nulo, la velocidad de respuesta está limitada por las características del servomecanismo.

TRANSDUCTORES DE LA MEDICIÓN AL INDICADOR

Por lo común, el dispositivo de presentación de la medición se localiza en un punto más o menos remoto de la ubicación en donde se midió la variable del proceso. Por tanto, la señal activadora del indicador, registrador o controlador es, casi siempre, diferente de la variable de proceso que se está midiendo. La variable de proceso se detecta por medio de algún dispositivo eléctrico, mecánico, químico o cualquier combinación de éstos, que la convierte en un movimiento o señal que se puede transmitir al dispositivo de presentación localizado a unos cuantos centímetros o a varios metros de distancia.

Aquí se verán varios ejemplos de los tipos de dispositivos transductores de empleo más común. En el caso de los equipos indicadores de origen electrónico, la transición de los tubos al vacío, pasando por los componentes discretos de estado sólido hasta llegar a los circuitos integrados, ha generado muchas diferencias entre los equipos antiguos que están en uso todavía, y los modernos.

Movimiento rotatorio o posición angular

Tren de engranaje El movimiento rotatorio y la posición angular se transducen con facilidad mediante varias clases de configuraciones o montajes de engranajes. Un tren de engranajes en combinación con un contador mecánico, como se ilustra en la figura 22-89, es una forma directa y eficaz para obtener una lectura digital de rotaciones de eje. Los números del contador pueden significar cualquier cosa que se desee según la razón del engranaje y el dispositivo activador utilizado para hacer girar el eje o árbol. Se acostumbra emplear una aguja indicadora conectada al tren de engranajes, para señalar una cantidad de revoluciones o una fracción pequeña de revolución, para cualquier rotación de aguja o puntero especificada.

Palanca o aguja indicadora Los montajes de palanca se emplean comúnmente como acoplamiento directo para convertir una posición física a una aguja indicadora. Las unidades con montaje en el sitio de trabajo y activación directa constituyen un buen ejemplo de este caso.

Sincromotor Con frecuencia se transduce, indica y transmite una posición de rotación utilizando el sincromotor (Fig. 22-90). Los motores que tienen estatores trifásicos y rotores bifásicos se conectan a la misma línea de alimentación ca. Los rotores R_1 y R_2 se mantienen estacionarios, a menos que se muevan por medio de una fuerza externa. Si el rotor primario R_1 gira, R_2 lo seguirá con un retraso de 1 a 3°.

Posición lineal Los transductores de posición lineal son similares a los rotatorios en que el movimiento y la ubicación se convierten fácil y económicamente a un indicador o presentador, mediante el empleo de engranajes y palancas. Las formas que éstos toman dependen del

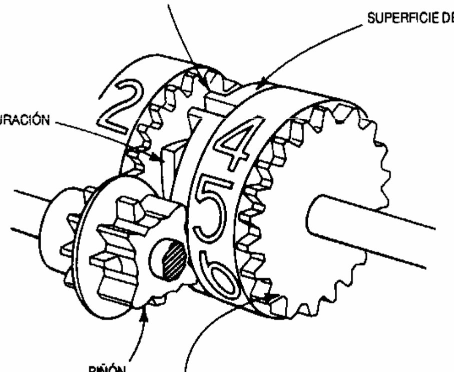


FIG. 22-89 Contador mecánico que comprende una transferencia de engranaje interrumpido entre las ruedas contadoras de decenas. El piñón y la rueda de la izquierda se mantienen estacionarios por medio de dos dientes largos del piñón y el anillo de seguridad de la rueda de la derecha. Para mover la rueda de la izquierda, el segmento de diente de la rueda de la derecha se engancha al diente del piñón haciéndolo girar hasta la siguiente posición de cierre y la rueda de la izquierda hasta la siguiente cifra.

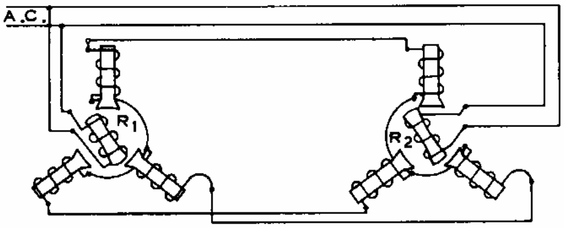


FIG. 22-90 Esquema de una transmisión sincromotora y su sistema de indicación.

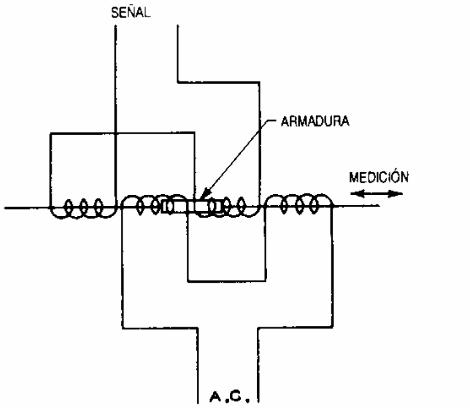


FIG. 22-91 Transformador diferencial utilizado para movimientos grandes.

ingenio del diseñador. Otros transductores se emplean en formas más específicas con la posición lineal.

Transformador diferencial Estos dispositivos producen una salida eléctrica en ca basándose en el movimiento lineal de una armadura. Son muy adaptables, dado que se pueden diseñar para un nivel de salida completa con cualquier intervalo de movimiento de armadura, hasta de varias pulgadas. En la figura 22-91 se ilustra un caso que se utiliza para un desplazamiento de armadura prolongado. Los transformadores tienen uno o dos primarios y dos secundarios conectados de tal modo que se oponen entre sí. Cuando se aplica un voltaje de ca al primario, el voltaje de la salida dependerá de la posición de la armadura y del acoplamiento. Estos dispositivos ofrecen exactitudes de 0.5 a 1.0% de la escala completa, y se utilizan para transmitir fuerzas, presiones, presiones diferenciales, pesos y otros, hasta 1524 m (5000 ft). También se diseñan para transmitir movimientos rotatorios.

Puente de inductancia Este dispositivo se utiliza para transmitir indicaciones desde el interior de instrumentos sellados, por ejemplo, manómetros y rotámetros medidores de flujo. Las bobinas transmisora y receptora se conectan como se indica en la figura 22-92, y el movimiento del transmisor de armadura de hierro dulce crea un campo magnético entre ambas, de tal manera que la armadura receptora se ubica por sí sola en forma similar.

Capacitancia Las posiciones de nivel de líquidos y sólidos se detectan con probadores o sondas de capacitancia continua. Una sonda de electrodo metálico aislado actúa como uno de los lados del capacitor, mientras que la pared del recipiente actúa como el otro. Las variaciones en el carácter dieléctrico del material comprendido entre el electrodo y la pared, se miden en el puente de capacitancia conforme se mueve el nivel de la entrecara aire-material. La salida del puente se convierte, casi siempre, en una señal eléctrica en el régimen de cc.

Fuerza o distorsión Existen muchos elementos sensores primarios que se utilizan para efectuar mediciones de variables de proceso, que generan una fuerza o una distorsión de diafragma o fuelle como respuesta a dicha variable. Esta fuerza o distorsión se convierte, casi siempre, en señales útiles de tipo neumático o eléctrico. Véase también la subsección "Medidores de esfuerzo" con referencia a la figura 22-93.

Fuelles Uno de los métodos comunes de transducción de señales neumáticas para fines de indicación o registro se realiza por medio de

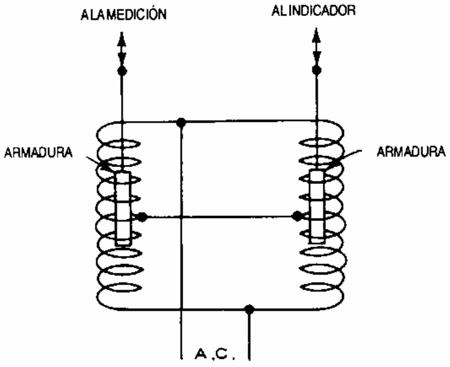


FIG. 22-92 Puente de inductancia.

fuelles. En la f
movido con fu
Amplificad
máticos que en
lla para detect
orificio y la b
ción constituy
la figura 22-9
(δ = 0), la pre
la misma que l
Conforme el d
y la de salida c
El cambio en l
del desviador
boquilla y la r
pequeñas para
Cuando el v
agregando un
de tubo, se inc
limitar el volt
tipo de relevad
grande con la
amplificado. I

; conectados de tal
voltaje de ca al pri-
;ión de la armadura
tactitudes de 0.5 a
smitir fuerzas, pre-
a 1524 m (5000 ft).
otatorios.

liza para transmitir
lados, por ejemplo,
obinas transmisora
a 22-92, y el movi-
crea un campo mag-
i receptora se ubica

dos y sólidos se de-
ontinua. Una sonda
os lados del capaci-
o el otro. Las varia-
mprendido entre el
acitancia conforme
salida del puente se
il régimen de cc.

os sensores prima-
variables de proce-
diafragma o fuelle
itorsión se convier-
co o eléctrico. Véa-
o" con referencia a

iducción de señales
ealiza por medio de

fuelles. En la figura 22-93 se muestra un dispositivo indicador usual movido con fuelles.

Amplificador neumático y relevador piloto En instrumentos neumáticos que emplean una combinación de orificio, desviador y boquilla para detectar cambios de movimiento o fuerza, es necesario que el orificio y la boquilla purguen aire en forma continua. Esta combinación constituye un amplificador neumático, que aparece ilustrado en la figura 22-94. Cuando el desviador está muy cerca de la boquilla ($\delta = 0$), la presión de aire dentro de la boquilla es, aproximadamente, la misma que la del abastecimiento, y la presión de salida es elevada. Conforme el desviador se aleja de la boquilla, la presión de esta última y la de salida decrecen, debido a la caída de presión en la restricción. El cambio en la presión de salida para una variación dada en la posición del desviador se determina según la geometría y las dimensiones de la boquilla y la restricción. Conviene que la boquilla y la restricción sean pequeñas para reducir el consumo de aire.

Cuando el volumen alimentado por el amplificador se incrementa agregando un fuelle, un motor de diafragma o una longitud prolongada de tubo, se incrementa también el tiempo de respuesta. Se acostumbra limitar el volumen alimentado empleando un relevador piloto. Este tipo de relevador piloto (Fig. 22-95) es capaz de alimentar un volumen grande con la misma presión de salida que el amplificador o que uno amplificado. Este dispositivo es similar a un regulador de presión en el

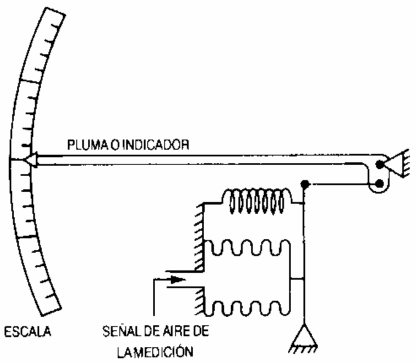


FIG. 22-93 Indicador impulsado por fuelle.

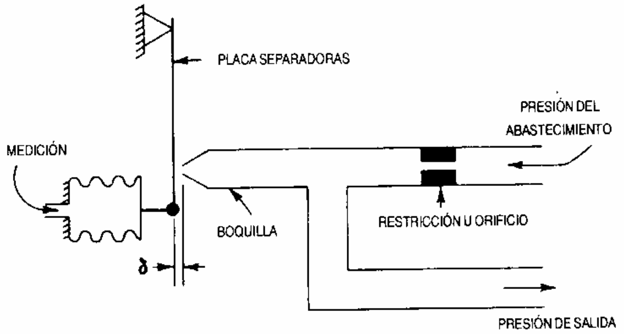


FIG. 22-94 Amplificador neumático de boquilla y placa separadora en el cual la presión de salida depende del espaciamiento δ entre la boquilla y la placa separadora.

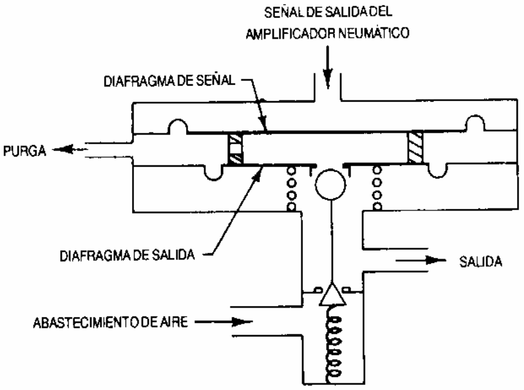


FIG. 22-95 Relevador piloto de tipo neumático.

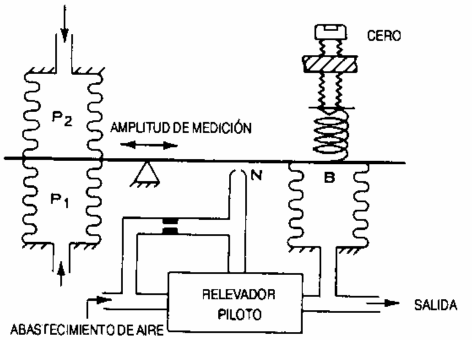


FIG. 22-96 Transmisor neumático de balanza de fuerzas.

cual el punto de ajuste o referencia se sustituye con el amplificador neumático. Un incremento en la salida del amplificador cierra primero el respiradero y abre la válvula de entrada del aire de abastecimiento. El aire entra y aumenta la salida del relevador piloto hasta que la presión de salida se equilibra con la presión de la señal de salida del amplificador. Si el diafragma de la señal es mayor que el de salida, el relevador piloto actúa también como amplificador.

El cambio en la separación del agitador y la boquilla para dar una salida de relevador de 20.7 a 103.4-kPa (3 a 15 lbf/in^2) es, casi siempre, menor que 0.0254 mm (0.001 in) cuando se usa la retroalimentación como se indica en la figura 22-96. El máximo consumo de aire de esta clase de relevador es de, aproximadamente, 0.85 m^3/s (30 ft^3/s).

Balanza de fuerza En la figura 22-96 se ilustra un transmisor neumático de balanza de fuerza del tipo brazo o balancín. La fuerza de cualquier tipo de medición (que en este caso se muestra como el fuelle de presión diferencial) se aplica a un brazo de la balanza de fuerza. El brazo obstruye el paso del aire que sale de la boquilla N, que forma parte de un amplificador y relevador neumáticos. Suponiendo que P_1 aumenta, el brazo se inclinará para elevar la presión de la boquilla, pero esto incrementa la presión en el fuelle B, lo cual restaura el brazo prácticamente en su posición original. Por tanto, la presión de salida se

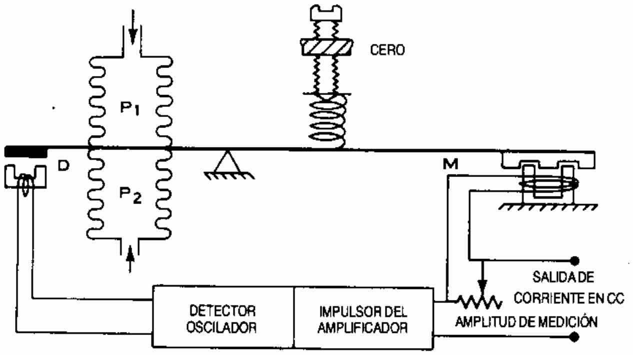


FIG. 22-97 Transmisor electrónico de balanza de fuerzas.

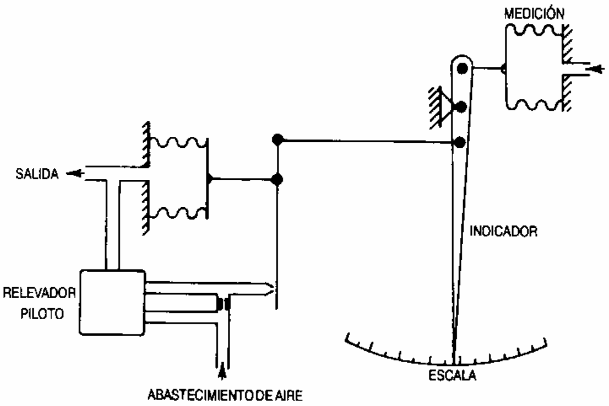


FIG. 22-98 Indicador neumático y transmisor con balanza de movimiento.

balancea o retro
exacta o en algún
este caso, lo que
Los transmiso
cutan las mismas
la misma secuen
la balanza de fue
ción, por ejempl
brazo producida
detector D que,
salida de una uni
aplica a la unida
al brazo, a fin d
rriente de la seña
En ocasiones
para convertir se
Sensores con
res manifiestan
que se puede ada
corriente por un
ejemplo, germa
orientados con
porcional al cam
Si se hace que l
imán permanen
voltaje proporci
un dispositivo d
conforme se alte
porcionan altas
temperatura y a

Balanza de m

Neumática I
de movimiento.
que, a su vez, in
plificador neum
vador piloto m
en una direcció
original. Así, p
miento de medi
Eléctrica E
miento, un cam
dispositivo de

son el amplificador
ador cierra primero
de abastecimiento.
nto hasta que la pre-
al de salida del am-
que el de salida, el

quilla para dar una
f/in^2) es, casi siem-
usa la retroalimen-
iximo consumo de
lamente, 0.85 m^3/s

un transmisor neu-
ncín. La fuerza de
estra como el fuelle
alanza de fuerza. El
uilla *N*, que forma
Suponiendo que P_1
de la boquilla, pero
taura el brazo prác-
resión de salida se

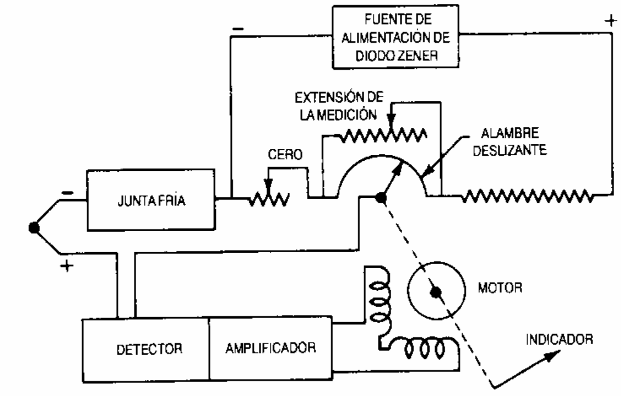


FIG. 22-99 Potenciómetro electromecánico de balance nulo.

balancea o retroalimenta con la presión diferencial, ya sea en forma exacta o en algún múltiplo que dependa de los brazos de la palanca. En este caso, lo que se transmite es la presión de balanceo.

Los transmisores de balanza de fuerza de naturaleza electrónica ejecutan las mismas funciones que los transmisores neumáticos y siguen la misma secuencia. Como se muestra en la figura 22-97, al brazo de la balanza de fuerza se le aplica una fuerza de cualquier clase de medición, por ejemplo, un fuelle de presión diferencial. La deflexión del brazo producida por la fuerza del fuelle diferencial es captada por el detector *D* que, a su vez, cambia la corriente continua del circuito de salida de una unidad amplificador-oscilador. La corriente de salida se aplica a la unidad de imán *M*, que suministra una fuerza de rebalanceo al brazo, a fin de completar el circuito de retroalimentación. La corriente de la señal de salida es proporcional a la fuerza de la medición.

En ocasiones se combinan partes de estos dos tipos de transmisores, para convertir señales de corriente eléctrica en señales neumáticas.

Sensores con el efecto de Hall Algunos materiales semiconductores manifiestan un fenómeno en presencia de un campo magnético, que se puede adaptar a dispositivos sensores. Cuando se hace pasar una corriente por un par de alambres conectados a un semiconductor, por ejemplo, germanio, otro par de alambres debidamente conectados y orientados con respecto al semiconductor desarrollará un voltaje proporcional al campo magnético y a la corriente del otro par de alambres. Si se hace que la corriente de excitación sea constante y se mueve un imán permanente cercano al semiconductor, producirá una salida de voltaje proporcional al movimiento del imán. El imán se puede unir a un dispositivo de medición de variable de proceso que mueva al imán conforme se altera la variable. Los dispositivos con efecto de Hall proporcionan altas velocidades de respuesta, excelente estabilidad de temperatura y ausencia de contacto físico.

Balanza de movimiento

Neumática En la figura 22-98 se ilustra un mecanismo de balanza de movimiento. Un dispositivo de medición mueve la aguja indicadora que, a su vez, impulsa al desviador que obstruye la boquilla de un amplificador neumático. La salida del amplificador que pasa por el relevador piloto mueve un fuelle que, a su vez, activa una palanca móvil en una dirección que hace que el desviador regrese cerca de su posición original. Así, pues, la presión de salida es proporcional al desplazamiento de medición o la ubicación de la aguja indicadora.

Eléctrica En los instrumentos eléctricos de transmisión de movimiento, un cambio de desplazamiento resulta a partir de algún tipo de dispositivo de medición, actuando por medio de un brazo o sistema articulado. Este desplazamiento se mide mediante un detector electrónico de posición, como, por ejemplo, un transformador diferencial o un detector magnético.

Balance nulo o de cero

Electromecánico El potenciómetro de balance nulo o de cero es un transductor electromecánico que se emplea con mucha frecuencia. Este tipo de potenciómetro sirve para medir señales a nivel de milivolts, sobre todo con termopares. En la figura 22-99 se muestra un diagrama esquemático simplificado de un potenciómetro usual que emplea una supresión de cero simplificada y un ajuste de intervalo.

La salida del termopar con la compensación de unión o junta fría necesaria se compara con la fem de la resistencia de ajuste a cero y una parte del alambre de resistencia uniforme, con contacto deslizante. La fem de la resistencia de ajuste a cero y el alambre deslizante o brazo móvil son porciones de un voltaje dividido que suministra una fuente de voltaje de diodo zener. Cuando la fem del termopar no es igual que la fem del alambre y la resistencia cero, la señal de error se convierte en una señal de ca por medio de un interruptor sincrónico impulsado por la línea (convertidor de cc-ca). La señal de ca se amplifica mediante el amplificador sensible a la fase y se aplica a un motor bifásico para impulsar el contacto del alambre deslizante en la dirección adecuada, con objeto de restaurar el equilibrio. El motor puede impulsar también un indicador o una pluma de registro, así como un brazo móvil de retransmisión. En la condición de balance (de cero o nulo), no fluye ninguna corriente neta en la parte que queda a la izquierda del alambre deslizante. Así, pues, la resistencia del circuito de termopar no participa en la medición de la fem.

Eléctrico El sistema eléctrico de balance de cero emplea una retroalimentación eléctrica y casi siempre abastece una señal de salida en cc. En la figura 22-100 se muestra un diagrama esquemático simplificado de este tipo de transductor. El termopar de entrada y la señal de milivolts de la unión fría, en combinación con el voltaje de supresión de cero, se aplica a un amplificador de cc, con entrada de interruptor periódico o rotatorio, que cuenta con una salida aislada. Si la corriente neta que pasa por la parte *E* de la resistencia *R* no es cero, se registra un flujo de corriente en el transformador de entrada del amplificador de bajo nivel y alta ganancia, con el resultado de que la salida del amplificador se ajusta para impulsar la corriente neta en *E* a cero. La corriente de salida del amplificador, póngase por caso, de 4 a 20 mA, se indica en un medidor, indicador o registrador apropiado.

Mediciones eléctricas El tipo más común de medidores indicadores de tipo eléctrico que se emplean en las industrias de proceso son el

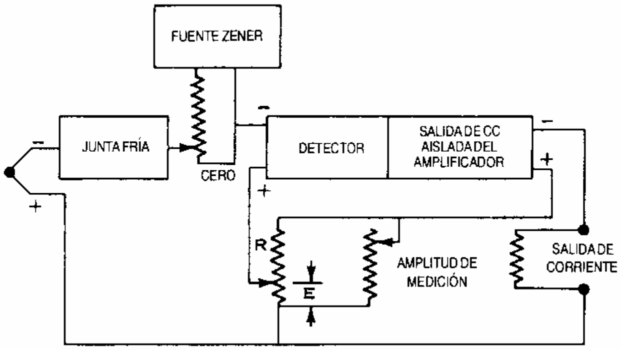


FIG. 22-100 Potenciómetro electrónico de balance nulo.

voltímetro y el amperímetro de cc d'Arsonval. Unas de las características típicas de estos aparatos son la carátula circular segmentada, en donde la aguja indicadora se mueve en el mismo plano que la escala, y el tipo lateral en el cual la aguja indicadora se mueve en torno a un eje ubicado detrás de la escala cilíndrica. Aunque los impulsores de plumas giratorias se operan por medio de servomecanismos, se utiliza un motor de deflexión magnética, que funciona directamente a partir de una señal de cc para impulsar la pluma.

Conversiones analógicas y digitales Muchas señales analógicas y digitales emitidas por dispositivos de medición se deben convertir en otra forma para poderlas utilizar. Por ejemplo, las salidas de pulsos de los medidores de flujo de turbina y algunos tacómetros se deben convertir en señales continuas para la indicación o el registro de índole analógica. La información en pulsos se emplea directamente por medio de un indicador, para fines de totalización.

Cuando se utilizan controladores con computadora digital, las señales analógicas de entrada de la variable de proceso se deben convertir en señales digitales eléctricas para que la computadora esté en posibilidad de manejarlas. Asimismo, las señales digitales generadas por la computadora deben convertirse en señales eléctricas analógicas para poderse aplicar a la mayor parte de los activadores de válvulas de control u otros dispositivos reguladores de control final. Los elementos de control final operados digitalmente no tienen un empleo muy difundido en la actualidad, incluso cuando los sistemas de control funcionan mediante computadoras digitales debido a problemas de costo y funcionamiento.

Conversión digital a analógica El convertidor en paralelo de resistencia compensada que se ilustra en la figura 22-101 es un ejemplo usual de convertidor digital a analógico (DAC). Consta de un registrador biestable (*flip-flop*), interruptores o conmutadores analógicos, una red de resistencia, una fuente de potencia de referencia y un amplificador operacional de salida. Esta clase de amplificador operacional se describe más detalladamente en relación con la figura 22-103.

En la señal de orden de carga, la entrada digital en paralelo (un conductor por cada *bit* de la señal digital binaria) coloca los registradores biestables (*flip-flop*) en las posiciones de verdadero o falso (uno o cero). A su vez, éstos hacen que los interruptores analógicos se coloquen en las posiciones encendido o apagado. Los interruptores conectan las resistencias apropiadas entre la fuente de referencia y la unión totalizadora. A continuación, el amplificador operacional emite un voltaje o una corriente de salida correspondiente a la señal digital de entrada.

Conversión analógica a digital El propósito del convertidor analógico a digital (ADC) es proporcionarle a la computadora digital una señal de esta misma naturaleza, que sea representativa del valor de la señal analógica. Uno de los métodos más utilizados es la aproximación sucesiva (ADC). Como se indica en la figura 22-102, se utiliza una salida en paralelo, es decir, cada *bit* de señal del número de salida digital se transporta en una línea de conducción independiente hasta la computadora. El número digital de salida se almacena, entonces, en un registrador biestable.

Al recibir un pulso de "iniciación de la conversión" la unidad de control ajusta el registrador biestable de más alto nivel en la posición verdadero y todas las demás en falso. Cuando se hace esto a todo lo largo del circuito, similar al DAC descrito en la figura 22-101, produce un voltaje V_f. A continuación, V_f se compara con el voltaje de entrada V_x. Si $V_x - V_f$ es positivo, la unidad de control deja en su posición a *FF*-1. Si $V_x - V_f$ es negativo, el registrador biestable se restaura a la posición falso. En el siguiente intervalo de reloj, la unidad de control ajusta a *FF*-2 y compara nuevamente V_f con V_x. Este proceso continúa hasta que todas las unidades biestables del registrador se han ajustado o restaurado y, entonces, se genera un pulso "final de conversión" que instruye a la computadora para que lea el registro.

INSTRUMENTOS INDICADORES

Analógicos Los indicadores de tipo analógico se clasifican en dos categorías principales: los de aguja móvil y los de escala móvil. Los indicadores de aguja móvil son los que se emplean con mayor frecuencia, y los de escala móvil se emplean comúnmente en combinación con dispositivos que funcionan con servomotores. La mayor parte de los indicadores de escala y aguja móviles son de deflexión.

La energía para los mecanismos indicadores puede ser directa, neumática o eléctrica, según sea, en parte, la proximidad del proceso y la naturaleza de la medición. Las agujas múltiples que utilizan una sola escala constituyen un caso bastante común. Los dispositivos como los medidores de presión, que utilizan el fluido del proceso para obtener la energía necesaria se emplean muy a menudo cuando el indicador está sobre el depósito de proceso o cerca de él.

Dispositivos de deflexión Los indicadores de aguja móvil que se encuentran usualmente en la instrumentación de procesos se clasifican en dos categorías. En una de ellas la aguja indicadora se mueve en un plano paralelo al tablero en el cual se monta el instrumento, y en la otra, se desplaza en un plano perpendicular al tablero. La primera clase requiere un gran espacio de tablero en comparación con la longitud de escala. La superficie rectangular mínima de tablero que se necesita es más ancha que la escala y más alta que la longitud de la aguja indicadora. En sistemas modernos de proceso, este tipo de medidor rara vez se utiliza en tableros de control, aunque sí se emplea con frecuencia en indicadores montados en el sitio de trabajo.

El movimiento de aguja más utilizado para ensamblajes en tableros es el del tipo lateral. En este caso, la aguja indicadora gira en un plano

perpendicular al
cilíndrica. La ag
el horizontal. C
longitud de la e
a una línea recta
que la longitud
Este tipo de in
asociadas con v
El movimient
modelos de disp
se asocia comú
obtiene conecta
Una ventaja d
comparación co
plear escalas m
instrumentos. P
montados en tal
in) de largo, util
los indicadores
calas móviles c
Autoimpuls
una fuente de e
toimpulsados c
res de presión d
nos de fluido, l
Con energía
dores de deflex

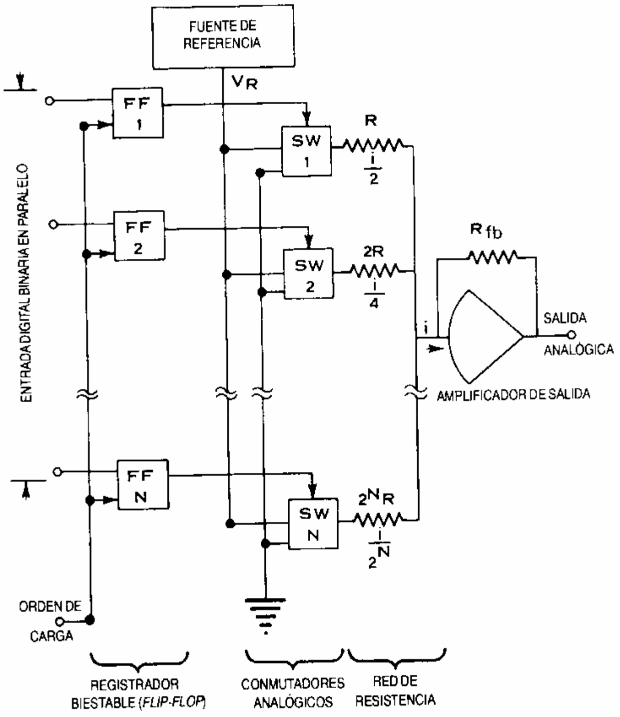


FIG. 22-101 Ejemplo usual de convertidor digital a analógico con resistencia compensada y entrada *N* en paralelo.

perpendicular al tablero, en torno a un eje ubicado detrás de una escala cilíndrica. La aguja se puede desplazar ya sea en el plano vertical o en el horizontal. Cuando se utiliza una aguja larga en comparación con la longitud de la escala, el movimiento de la misma se aproxima mucho a una línea recta. Las presentaciones compactas son frecuentes, puesto que la longitud de la aguja no afecta el espacio de tablero necesario. Este tipo de indicador se presta especialmente para presentaciones asociadas con variables que están muy cerca unas de otras.

El movimiento en línea recta de la aguja indicadora existe en varios modelos de dispositivos de presentación. Esta presentación en línea recta se asocia comúnmente con instrumentos de registro y casi siempre se obtiene conectando la aguja a un cable movido por un servomecanismo.

Una ventaja de la escala móvil impulsada por un servomecanismo, en comparación con los indicadores de aguja móvil, es que se pueden emplear escalas más largas que consumen el mismo espacio del tablero de instrumentos. Por ejemplo, se encuentran instrumentos de alta densidad montados en tableros, que emplean una escala móvil de 190.5 mm (7.5 in) de largo, utilizando apenas 76.2 mm (3 in) de espacio de tablero. En los indicadores de temperaturas tipo consola, se han utilizado mucho escalas móviles con longitudes eficaces de más de 711.2 mm (28 in).

Autoimpulsados Cuando los dispositivos indicadores no requieren una fuente de energía externa para funcionar, se clasifican como autoimpulsados o de alimentación directa. Estos incluyen los indicadores de presión de tubo de Bourdon, los indicadores de temperatura llenos de fluido, los tacómetros autoimpulsados y los rotámetros.

Con energía neumática En las industrias de procesos, los indicadores de deflexión más predominantes son los que operan con energía neumática. El movimiento de la aguja se deriva de la presión de aire que actúa directamente a través de fuelles o diafragmas, más un sistema articulado o de palancas conectado al indicador, o bien, indirectamente por medio de un servomecanismo neumático que se une al dispositivo indicador.

Con energía eléctrica El movimiento de medidor de cc tipo d'Arsonval más común constituye la mayor proporción de todos los dispositivos eléctricos de indicación para procesos. Generalmente es el elemento básico de medición, ya sea que la señal de proceso sea una cc o un voltaje de cc. En las industrias de procesos se utilizan pocos indicadores de variables tipo voltímetro de ca, y por lo común se asocian con la generación y el consumo de energía eléctrica. Los indicadores de propulsión eléctrica por medio de servomecanismos se asocian, casi siempre, con aparatos de registro.

Los indicadores de variables de proceso en algunos cuartos de control modernos son del tipo de desviación; son aparatos con cero central, en donde la desviación a partir del punto de media escala representa la desviación en relación con el punto de ajuste. La escala puede ser un cuadrante o una escala móvil.

De varias agujas Los medidores que cuentan los watts-hora y otros instrumentos totalizadores utilizan a veces agujas indicadoras separadas para unidades, decenas, centenas, etc. Esta presentación es simple y poco costosa e impone una carga muy pequeña en el mecanismo motriz. Sin embargo, tiene la desventaja de que cuando la persona encargada de tomar la lectura no posee gran experiencia comete errores con facilidad.

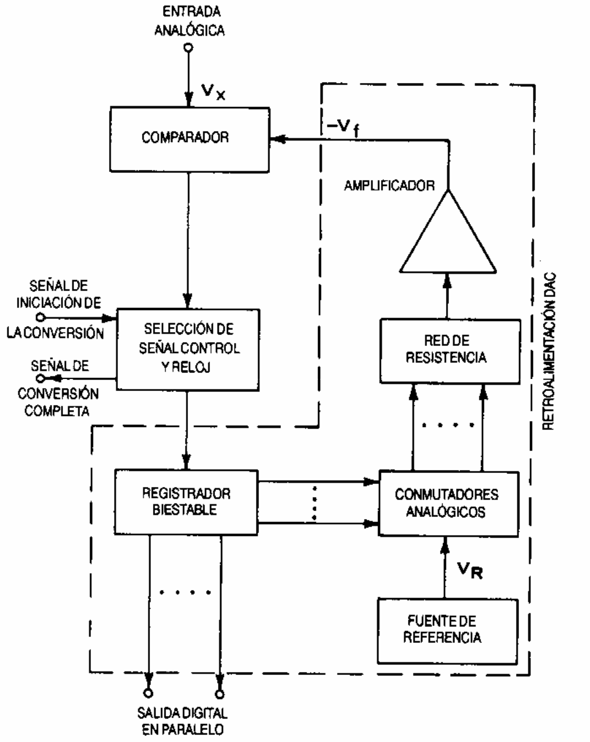


FIG. 22-102 Convertidor analógico a digital de retroalimentación en paralelo y aproximación sucesiva.

Indicadores para materiales en movimiento Muchas mediciones de proceso utilizan el fluido mismo de proceso para efectuar la indicación. Los medidores de flujo-no flujo y los indicadores de niveles de líquidos se caracterizan por una indicación visual local cuando el nivel o el movimiento de fluido del proceso o el flotador se detectan a través de tubos transparentes o ventanillas de observación.

Digitales En tiempos pasados, resultaba más barato y fácil obtener datos de proceso para la computación y los registros utilizando indicadores analógicos, por medio de notaciones manuales, que con indicadores digitales. La expansión reciente del empleo de computadoras digitales ha permitido que grandes masas de información ya procesada en la forma digital quede disponible para lograr presentaciones esencialmente instantáneas. Esto, acoplado con los desarrollos electrónicos de estado sólido en la conversión analógica digital, ha favorecido un incremento muy notable en las lecturas o presentaciones digitales.

Lectura digital La presentación directa de caracteres o equivalentes codificados ofrece las siguientes ventajas en comparación con las lecturas analógicas:

1. La presentación de varios dígitos en un renglón no requiere ninguna traducción. Las lecturas de los medidores analógicos comprenden a menudo el empleo de verniers, escalas múltiples, curvas de calibración y otras complicaciones.

2. Las presentaciones digitales electrónicas son tan precisas como la información que se les da. Además, las presentaciones digitales electrónicas reducen las posibilidades de fallas en el funcionamiento mecánico y errores en las lecturas por parte del operario.

3. La mayor parte de las lecturas digitales registran datos tan rápidamente como el ojo humano puede seguirlas. Del mismo modo, los caracteres se colocan con toda claridad a fin de evitar presentaciones confusas.

4. Muchas lecturas digitales se pueden emplear como contadores o como indicadores. Además de los números, algunas lecturas señalan letras del alfabeto, mensajes completos y caracteres especiales. Por lo común, los medidores analógicos manejan sólo una o dos unidades de medición íntimamente relacionadas entre sí. Con los medios de conmutación apropiados, las lecturas digitales electrónicas son capaces de registrar con gran rapidez unidades y símbolos de medición muy diferentes entre sí, por ejemplo, tiempo, temperatura, presión, flujo, etc.

Contadores mecánicos El dispositivo de lectura digital de empleo más frecuente es el llamado contador mecánico. En este caso, se tienen ruedas numeradas con diez dígitos montadas mecánicamente unas al lado de las otras. Las ventanillas que quedan frente a cada rueda presentan un renglón de dígitos que representa la suma o cuenta total. La mayor parte de los contadores tienen de cuatro a seis dígitos. El contador se restaura a cero por medio de un botón, una palanca o una rueda. Véase la figura 22-89.

Eléctricos Debido a los desarrollos en los dispositivos eléctricos y electrónicos para la presentación digital, ahora se dispone de una amplísima variedad d
descripción someri
1. *Presentación*
plástico acrílico g
de lectura, con lán
una de las placas p
una lamparita se e
se ilumina y se ve
presentaciones qu
2. *Presentación*
compone de módul
terior de una cubie
transparente graba
sación. Cuando se
de ella se proyecta
de visión hasta de
3. *Tubo de regis*
poseen elementos a
un ánodo común. L
de descarga de gas
traductores binario
vida, altas velocida
rriente de cátodo se
4 *Segmentos de*
lares que incorpora
caracteres, emple
segmentos, se pue
teres alfabéticos. E
tar todos los nume
sentación de los se
tener un ángulo de
5. *Tubos al vac*
barras segmentada
una descarga de ba
la gran intensidad
reducido de energ
cuitos integrados
y funciones de co
6. *Tableros elec*
de tablero son ca
individualmente p
taje que se aplica
son una operación
cas fallas súbitas. I
de circuitos exter
pondientes y fuent
segmento posee s
7. *Segmentos d*
mentos de barra in
fósforo-arceniuro
brillantez es limita
8. *Matrices* La
tores ópticos agru
pantalla de visión.
sólido y una red d
convirtiéndolos e
correctas para for
9. *Tubos al vac*
sentación del tipo
dicos. Un tubo de
ra de los 10 num
fluorescente. La p
una fuente de ener
10. *Tubos de ra*
bos de rayos catód
clientes para aplic
completos que pr

plísima variedad de aparatos de esta índole. A continuación se da una descripción somera de los tipos más comunes.

1. *Presentación iluminada* Consiste en un conjunto de placas de plástico acrílico grabadas, que se acomodan detrás de una ventanilla de lectura, con lámparas miniatura montadas sobre el borde de cada una de las placas para que puedan iluminarlas con claridad. Cuando una lamparita se enciende, el carácter o mensaje grabado en la placa se ilumina y se ve a través de las otras placas. Éstas se utilizan en presentaciones que se observan muy de cerca y en forma directa.

2. *Presentación de imagen proyectada* Este tipo de presentación se compone de módulos que tienen lámparas acomodadas en la parte posterior de una cubierta hermética a la luz, detrás de un número entero transparente grabado en una cubierta opaca sobre una lente de condensación. Cuando se enciende una lámpara, el carácter que está delante de ella se proyecta sobre una pantalla. Esta clase puede tener un ángulo de visión hasta de 150°.

3. *Tubo de registro* Estos son los llamados tubos o bulbos "nixie", y poseen elementos amontonados en la forma de numerales metálicos con un ánodo común. Los caracteres seleccionados resplandecen como tubo de descarga de gas cuando se aplica un voltaje negativo. También existen traductores binarios enchufables. Las principales ventajas son una larga vida, altas velocidades y bajo consumo de energía. Sin embargo, la corriente de cátodo se debe mantener dentro de límites estrictos.

4 *Segmentos de barras* Hay varios tipos de presentaciones modulares que incorporan segmentos de barra iluminados para constituir los caracteres, empleando ya sea 7 o 16 segmentos. En el caso de los 7 segmentos, se pueden presentar todos los numerales y algunos caracteres alfabéticos. En el caso de los de 16 segmentos, es factible presentar todos los numerales y el alfabeto completo. El hecho de que la presentación de los segmentos de barra se haga en un solo plano, permite tener un ángulo de visión hasta de 150°.

5. *Tubos al vacío de bajo voltaje* Estos módulos cuentan con siete barras segmentadas de material fosforescente, que se excitan mediante una descarga de baja temperatura. Sus ventajas son el costo reducido, la gran intensidad, su gran duración, altas velocidades y el consumo reducido de energía. Se encuentran ya en el mercado paquetes de circuitos integrados para proporcionar almacenamiento de codificación y funciones de conteo.

6. *Tableros electroluminiscentes* Las lámparas de estos segmentos de tablero son capacitores luminosos de placa plana, que se excitan individualmente por medio de una señal de alta frecuencia o alto voltaje que se aplica a sus electrodos. Las ventajas de esta presentación son una operación sin calentamiento, bajo consumo de corriente y pocas fallas súbitas. Las desventajas son un bajo nivel de luz, la necesidad de circuitos externos extensos para efectuar las traducciones correspondientes y fuentes de energía de alto voltaje y alta frecuencia. Cada segmento posee su propia fuente de lámpara.

7. *Segmentos de barras de estado sólido* Son similares a los segmentos de barra incandescentes, excepto que la fuente lumínica es un fósforo-arceniuro de galio. Su duración de vida es casi infinita, pero su brillantez es limitada.

8. *Matrices* Las matrices consisten en lámparas de neón en reflectores ópticos agrupados en un patrón de mosaico sólido detrás de una pantalla de visión. Consta de un contador integral miniatura de estado sólido y una red descodificadora que traduce los pulsos secuenciales convirtiéndolos en la presentación digital, encendiendo las lámparas correctas para formar una imagen.

9. *Tubos al vacío de alto voltaje* Estas unidades combinan la presentación del tipo de proyección posterior con un tubo de rayos catódicos. Un tubo de rayos catódicos con 10 "pistolas" proyecta cualquiera de los 10 numerales a través de una rejilla sobre una pantalla fluorescente. La principal desventaja en este caso es la necesidad de una fuente de energía de alto voltaje en cc (2.5 kV).

10. *Tubos de rayos catódicos* Las presentaciones por medio de tubos de rayos catódicos son, por lo común, diseñados a petición de los clientes para aplicaciones sumamente especializadas. Hay sistemas completos que proporcionan información alfanumérica ordenada en formatos predeterminados. El uso de presentadores de tubos de rayos catódicos en el control de procesos es todavía limitado.

11. *Diodos emisores de luz* Cada dígito o carácter consiste en una matriz de diodos de fósforo-arseniuro de galio que emiten luz. Se tiene un circuito integrado que traduce una entrada digital para impulsar los elementos de diodo apropiados para efectuar la presentación. El circuito integrado y los diodos se montan en un ensamblaje plano con una cubierta de vidrio. La emitancia luminosa de los diodos es ajustable.

INSTRUMENTOS DE REGISTRO

Analógicos Los registradores gráficos de tipo analógico pueden agruparse de acuerdo con el tipo de gráfica utilizada, como registradores de gráfica circular y de tira, y de acuerdo con el mecanismo de registro, en individuales y múltiples continuos que utilizan pluma y tinta fluida, registros intermitentes de muchos puntos que emplean una estilográfica o una rueda de impresión y tinta semifluida, o bien, mecanismos de registro especiales.

Gráfica circular Los registradores de gráfica circular se emplean bastante en las industrias de proceso. Aunque su empleo en el cuarto de control se ha sustituido con la gráfica miniatura en tira, son un mecanismo eficaz y útil para obtener registros permanentes de una planta. Los registradores de gráfica circular de empleo más común tienen un diámetro de gráfica de 305-mm (12 in). Las velocidades de las gráficas circulares van de una revolución por minuto hasta una revolución por mes. También existe una amplia selección de escalas. Hay poca o ninguna intercambiabilidad entre gráficas para instrumentos de diferentes fabricantes.

La gráfica circular ofrece varias ventajas; se maneja y se llena con facilidad; cuando se saca del registrador queda plana y no tiende a enrollarse; se puede montar y desmontar con mucha mayor sencillez que otras clases de gráficas. La exactitud básica de la gráfica es muy buena. A pesar de la escala de tiempo variable del cubo de rueda a la circunferencia, los registros logrados con esta clase de gráficas se emplean con mucha frecuencia para fines de supervisión y contabilidad, y como registros de asentamiento en ventas o transferencia de productos por contrato.

Existen unidades motrices eléctricas y mecánicas para las gráficas, y casi siempre son intercambiables para un fabricante particular. Los motores mecánicos son muy apropiados para regiones en las cuales hay peligros de explosión o en ubicaciones remotas. Hay instrumentos de varios puntos hasta con cuatro registros continuos. Los registradores de gráficas circulares en receptáculos grandes se pueden colocar en cubiertas a prueba de condiciones climatológicas para aplicaciones remotas o en el campo.

El gran espacio de tablero en el cuarto de control que se necesita para registradores de gráficas circulares aumenta el costo de tablero y dispersa la presentación, reduciendo materialmente la capacidad del operador para controlar el proceso. A menos que las gráficas se cambien regularmente y, más o menos al mismo tiempo, los registros se pueden superponer, con lo cual se dificultará su lectura e interpretación.

Gráfica en tira Actualmente hay en el mercado una gran variedad de registradores de gráfica en tira. Los anchos de gráfica de empleo más común son escalas de 279, 152 y 102 mm (11, 6 y 4 in). Los registradores de gráfica en tira miniatura se clasifican, por lo común, en dos categorías: la caja cuadrada [casi siempre en un espacio de 152 por 152 mm (6 por 6 in)] y la caja angosta [de 76 mm (3 in) de anchura aproximadamente, y casi siempre en combinación con una estación de control].

1. *Gráfica ancha* El registrador de gráfica en tira con una escala de 279 mm (11 in) de ancho es invariablemente eléctrico y se opera con un servomecanismo, tiene coordenadas rectilíneas y viene con uno o dos registros continuos, o con una variedad de configuraciones de registro de varios puntos (discontinuos). Esta clase de registrador se desarrolló para medir temperaturas con termopar, y se emplea para registrar variables eléctricas de proceso y la salida eléctrica de transductores de variables no eléctricas.

El instrumento es exacto y confiable; es muy flexible y admite funciones auxiliares como control, alarma y contactos de señal, así como sistemas de retransmisión.

Existen varias velocidades de gráfica a la disposición, desde unos cuantos centímetros por día, hasta varios metros por minuto. Las velocidades de pluma de 1 o 2 s para escalas completas son un nivel estándar, aunque se llegan a tener velocidades hasta de $^1/_4$ s. Varios fabricantes tienen servomecanismos para la gráfica que proporcionan un registro de corta longitud que es una función de dos variables; una que impulsa la pluma y otra que mueve la gráfica.

Los registradores de gráfica ancha en tira se utilizan mucho en operaciones de procesos industriales como registradores de temperatura, en operaciones de plantas-piloto, para analizar y verificar registros y en aplicaciones especiales en donde la exactitud del instrumento y la facilidad de lectura de las coordenadas rectangulares de los registros de tira ancha, adquieren una importancia específica. Para cuartos de control central, las aplicaciones se restringen por lo común a mediciones de temperatura de varios puntos, por medio de termopares.

2. *Gráfica mediana* El registrador de gráfica en tira con escala de 6 in se utiliza, más o menos, en la misma clase de aplicaciones que el registrador de banda ancha de 11-in. La entrada básica de los registradores de tamaño mediano es una señal a nivel de milivolts. Sus dimensiones generales de, aproximadamente 229 mm (9 in) de ancho y 254.0 mm (10 in) de altura, proporcionan un ahorro de espacio considerable de superficie de tablero. Asimismo, tiene otras varias opciones y admite funciones de control neumáticas o electrónicas.

3. *Gráfica en tira miniatura* De la diversidad de tamaños disponible, la más común mide, más o menos, 152 por 152 mm (6 por 6 in) con una longitud de escala de 102 mm (4 in). Estos registradores miniatura aparecen normalmente sólo como elementos de registro y recepción, pero algunos modelos tienen la capacidad de operar como estación de control y registro. Las señales de activación pueden ser de naturaleza neumática, de 20.7 a 103.4 kPa (3 a 15 lbf/in^2), o bien, señales eléctricas en cc de 1 a 5, 4 a 20 y 10 a 50 mA. Existen dispositivos hasta de 4 registros continuos. La velocidad de gráfica está, casi siempre, en la cercanía de 19 mm/h ($^3/_4$ in/h). Casi todos los registradores de gráfica en tira o cinta tienen un movimiento de pluma lineal y gráficas rectilíneas. Los mecanismos motrices de la pluma se operan, casi siempre, con servomotores. Los registradores miniatura se diseñan por lo común para funcionar en ensamblajes de tablero en habitaciones internas.

Los registradores miniatura con gráfica en tira angosta [aproximadamente 76 mm (3 in) de ancho] desempeñan las mismas funciones que los registradores de 6 × 6 in. El registrador se puede encontrar en el mismo chasis que una estación de control automático o manual. Los registradores angostos se desarrollaron para ahorrar espacio de tablero y reducir los costos del cuarto de control, así como en la mano de obra de operación.

Los fabricantes de registradores tanto de 6 por 6 in y los angostos de 3 in [algunas estaciones de control e indicadoras son de 25 mm (1 in) de ancho], suministran repisas de ensamblaje para varios instrumentos que se pueden colocar unos al lado de otros para lograr una mayor densidad instrumental.

Digitales El registro digital no se utiliza muy frecuentemente en las industrias de procesos, a menos que se emplee un sistema de control con computadora digital. En plantas de procesamiento que emplean instrumentación tradicional, el operador se preocupa por mantener las variables de proceso en puntos de operación fijos o especificados, sobre una base continua. Así, pues, el historial o la tendencia manifestada por las variables de proceso es un aspecto importante para el siguiente curso de acción que tome el operador. El registro analógico se presta idealmente para este fin. En general, un registro digital del tipo de una larga columna de números, es, casi siempre, más difícil de interpretar.

Teletipo asociado a una computadora En plantas de procesamiento en donde se utilizan controladores de computadora digital para realizar un control digital directo o de punto de referencia, el registro de la información digital es una función básica del sistema de control por computadora. Una unidad de teletipo con la capacidad de comunicarse con la computadora, es decir, de enviar y recibir la información digital, es un equipo estándar y esencial del sistema de control por computadora.

1. *Registro periódico* Los teletipos se pueden conectar a una computadora bajo el control de un programa, y darle instrucciones para poner en marcha e imprimir una lista de variables de proceso y sus valores, en una base periódica predeterminada. Los registros de procesos se elaboran también bajo petición del operador.

2. *Registrador de datos* El registro de datos se ha aplicado a gran cantidad de plantas de procesamiento. El término "registro de datos" se refiere, por lo común, a la exploración e impresión de valores de variables de proceso, utilizando equipos diseñados específicamente para anotar datos en forma ordenada. Con las señales de entrada sólo se realizan tareas de escalamiento y algunos cálculos menores. Los valores (expresados en unidades de ingeniería) de un gran grupo de variables de proceso se escriben o imprimen en forma secuencial y a intervalos regulares, tomando las previsiones necesarias para hacer una impresión de salida en cualquier momento que se requiera, o cuando los valores queden fuera de los límites de tolerancia. Esta clase de registro digital se emplea primordialmente para estudios de procesos en los cuales se reúnen y analizan hojas de registro, que es una tarea que corresponde a los ingenieros de proceso.

3 *Impresora de tiras* Existen pequeñas impresoras de tiras (algunas con circuitos integrados) que convierten, exploran e imprimen una cantidad limitada (menos de 50) de señales eléctricas de entrada. La salida impresa es de tipo columnar, en papel angosto de 51 mm (2 in) de ancho, en donde cada variable se identifica mediante un número. Algunas operaciones de combinación en línea emplean este tipo de impresoras para totalizar la lectura del flujo de salida.

CENTRO DE CONTROL

Requisitos de información Uno de los objetivos principales de un centro de control de una planta de procesamiento es suministrar toda la información que se requiere para desarrollar el proceso. Hay tres usuarios principales de esta clase de información: los operadores, el departamento administrativo y el equipo automático. El operador es responsable del buen funcionamiento de las unidades de proceso que están bajo su supervisión. Para satisfacer esta responsabilidad, el operador debe tener a su disposición información actualizada sobre todas las variables de proceso. Necesita contar con alarmas que llamen su atención ante situaciones de peligro, daños o fallas potenciales en el equipo, productos fuera de las especificaciones estipuladas y situaciones que representen un riesgo para las cargas tratadas y programadas.

El operador debe contar también con toda la información actualizada del controlador, como, por ejemplo, puntos de referencia, constantes de ajuste y salidas de controlador o posiciones de válvula. En ocasiones se ve obligado a utilizar información sobre las tendencias de la variable de proceso y guías de operación calculadas sobre balances de material y calor. Además, necesita cierta información proveniente de otros operadores de otras secciones de la planta, sobre todo si tales secciones reciben material de proceso o ellas mismas lo abastecen a la unidad de procesamiento bajo su cargo. También necesita datos sobre metas del proceso, disponibilidad de equipos y resultados de procesos que la administración deberá proporcionarle.

La administración requiere información concerniente a resultados como velocidades de alimentación, volúmenes y calidad de productos, rendimientos y costos de operación para fines de contabilidad. La evaluación del desempeño del proceso y los estudios de ingeniería precisan esta misma información y, con frecuencia, muchos otros datos adicionales.

Al igual que un hombre, el equipo automático necesita tanto informes como instrucciones. Suponiendo un alto grado de automatización por computadora en el control del proceso, como se ilustra en la figura 22-151, el equipo necesita entradas de información de variables de proceso, puntos de referencia e información económica, programación de tiempo y lógica, límites para las alarmas, parámetros de ajuste

para el controlador
dad de proceso pue
debe contar con in
de un centro de co

Funciones del
es suministrar los
control ejercido du
supervisión neces
del nivel de autom
22-151. El control
operador. Otra de
ceso con la suficie

La operación de
mente. Los operad
en periodos proble
rra uno de los obj
decir, compensar l
fiabilidad y perfec
llarse mejores alg
fianza del operad
modalidad manua

El arranque aut
en forma manual
automatizar todas

La suspensión
arranque. Aunque
das en situaciones
pre mejor definid
con flechas para s

Presentación d
diseñadas desde e
los instrumentos i
preponderancia c
operador humano
procesos de gran
los registradores
conmutadores, al
dicación clara y a

Los desarrollos
evolucionado a t
tableros semigráf
rado y tableros se
repisas de unidad
zan computadora
control de punto d
po de comunicac
mentos comunes
enlacen la compu

Totalmente gr
mente un diagram
tablero de control
caciones apropia
presenta una ima
y control en su r
miento del operac
un instrumento c
ciones totalmente

El enorme espa
un cargo adicion
desventaja de qu
dual. Cualquier c
muy costoso. Es
variables de proc
des están agrupad
tamente gráficos
samiento.

Semigráficos
espacio de table

para el controlador y procedimientos de emergencia. Para que una unidad de proceso pueda estar coordinada con otras, el equipo automático debe contar con información de otros centros de control u otras partes de un centro de control de mayor tamaño.

Funciones del equipo El segundo propósito del centro de control es suministrar los medios para controlar el proceso. Por lo común, el control ejercido durante la operación normal es de tipo automático. La supervisión necesaria para el equipo de control automático depende del nivel de automatización que se examina en relación con la figura 22-151. El control manual es una opción con que siempre cuenta el operador. Otra de las opciones disponibles, cuando se conoce el proceso con la suficiente profundidad, es el control automático óptimo.

La operación de emergencia se realiza ya sea manual o automáticamente. Los operadores tienden a poner el proceso bajo control manual en periodos problemáticos. Muy a menudo, esto viene a echar por tierra uno de los objetivos más importantes del equipo automático, es decir, compensar los efectos de las perturbaciones. Al mejorar la confiabilidad y perfeccionarse las capacidades del controlador, al desarrollarse mejores algoritmos de control y conforme va en aumento la confianza del operador, los circuitos de control se encontrarán en la modalidad manual con menor frecuencia cada vez.

El arranque automático se logra mediante un control programado o en forma manual. Las computadoras digitales de control permiten automatizar todas las decisiones conocidas que se deben tomar.

La suspensión se efectúa, más o menos, en la misma forma que el arranque. Aunque las suspensiones son con frecuencia medidas tomadas en situaciones de emergencia, los procedimientos están casi siempre mejor definidos. Muchos cuartos de control emplean diagramas con flechas para suspensiones de urgencia.

Presentación del sistema Las presentaciones o disposiciones bien diseñadas desde el punto de vista de ingeniería, que son importantes en los instrumentos individuales de indicación y registro, adquieren una preponderancia crucial en el diseño del cuarto de control, en donde el operador humano debe manejar datos concernientes a operaciones de procesos de gran importancia y a menudo básicas. Los indicadores y los registradores se deben coordinar con controles, interruptores o conmutadores, alarmas y equipos auxiliares, a fin de presentar una indicación clara y accesible de las condiciones del proceso.

Los desarrollos logrados en los centros de control de proceso han evolucionado a través de varias etapas: tableros totalmente gráficos, tableros semigráficos con instrumentos de control montados por separado y tableros semigráficos con instrumentos de control montados en repisas de unidades múltiples. Las plantas de procesamiento que utilizan computadoras digitales para ejercer un control digital directo o un control de punto de referencia pueden tener una combinación de equipo de comunicación hombre-computadora de tipo especial, instrumentos comunes y estaciones de control de objetivos especiales que enlacen la computadora con el proceso.

Totalmente gráfico El tablero totalmente gráfico es fundamentalmente un diagrama de flujo pictórico del proceso, que se pinta sobre el tablero de control con instrumentos en miniatura montados en las ubicaciones apropiadas, siguiendo el diagrama propiamente dicho. Esto presenta una imagen clara y generalizada de cada elemento de proceso y control en su relación con el todo. También simplifica el adiestramiento del operador y puede reducir los azares originados al confundir un instrumento con otro. No obstante, las desventajas de las disposiciones totalmente gráficas sobrepasan, por lo común, a las ventajas.

El enorme espacio de tablero que se requiere es costoso y representa un cargo adicional importante al cuarto de control. Además, tiene la desventaja de que la ingeniería para su fabricación es de tipo individual. Cualquier cambio realizado después de la instalación inicial es muy costoso. Es difícil que el operador observe con rapidez todas las variables de proceso, sobre todo cuando los procesos de varias unidades están agrupados en un solo cuarto de control. Los tableros completamente gráficos se utilizan raramente en las nuevas plantas de procesamiento.

Semigráficos Los tableros semigráficos permiten un mejor uso del espacio de tablero que los totalmente gráficos. Los indicadores, los registradores, los controladores y los equipos auxiliares se agrupan según las exigencias del proceso. La porción gráfica de la presentación es, por lo común, un diagrama de flujo pictórico a pequeña escala, que se monta sobre los instrumentos. Esto puede ser sencillamente un dibujo de líneas, que puede incluir colores o luces para localizar instrumentos de operaciones, interruptores y válvulas en el diagrama.

Las primeras presentaciones semigráficas utilizaban instrumentos en miniatura montados en estructuras por separado. La demanda de una mayor densidad de instrumentos en los tableros de control llevó a desarrollar instrumentos de frente angosto que contaban con los medios necesarios para montarse en cubiertas para muchas unidades.

Estas etapas han incrementado notablemente la cantidad de instrumentos que un operador puede supervisar desde un punto determinado. También ha cambiado el diseño general del cuarto de control. La mayor concentración instrumental ha hecho necesario el empleo de estanterías para equipos auxiliares, con el fin de montar transductores, conmutadores, anunciadores y dispositivos auxiliares.

Cuando se utiliza un controlador de computadora digital en línea para realizar directamente funciones de circuitos de control individuales, el tablero de control contiene, en general, estaciones indicadoras de control que enlazan a la computadora con cada circuito individual de control de proceso. Estos sistemas directos de control digital (DDC) tienen normalmente un tablero que contiene presentaciones digitales y medios para cambiar los puntos de referencia del circuito y la sintonización del controlador.

Estaciones de control Por supuesto, la función primaria de un controlador de procesos es mantener una o más variables del proceso en los puntos de referencia deseados, o cerca de ellos. No obstante, puesto que el operador es responsable por el buen desempeño del proceso, deben proporcionarse algunos medios para permitirle verificar si el controlador está realizando su trabajo, y permitirle tomar a su cargo el control del proceso, cuando sea necesario. La estación de control ofrece esta conexión entre el operador y el proceso.

Cada estación de control cuenta con cinco partes esenciales: **1)** un indicador de variables del proceso, **2)** un mecanismo de ajuste del punto de referencia, **3)** un dispositivo de ajuste (denominado casi siempre, manual), que maneja directamente la señal hacia la válvula de control, **4)** un indicador de señal de salida, y **5)** un dispositivo para efectuar la conmutación entre la modalidad automática de control y la manual. La instalación de los cinco elementos esenciales de una estación de control varía según el fabricante, pero deben estar presentes en cualquier circuito de control, ya sea en el neumático, el electrónico o el computarizado.

En los tableros de control normales de tipo neumático o electrónico, la estación de control se localiza normalmente a un lado del controlador. Si se está registrando la variable de proceso, el registrador queda adyacente a la estación de control y el controlador o, por lo menos, cerca de ellos.

En los sistemas actuales de control de computadora de DDC, estas cinco funciones de la estación de control se presentan en la consola del operador, en donde se establece comunicación con un circuito de control específico, por medio de un teclado de botones. Todas las funciones de la estación de control, excepto el punto de referencia del controlador, se duplican también en las estaciones de control de los circuitos individuales. Según la redundancia o la iteración necesaria, en algunos diseños se incluye un controlador analógico electrónico de refuerzo, y su ajuste de punto de referencia, en la estación de control del circuito individual.

Indicador de la variable de proceso Los indicadores de las variables de proceso se ofrecen en muchas formas. En instrumentos de caja grande, el indicador puede ser una aguja sobre una escala circular u horizontal. Puede formar parte de un controlador, un registrador o ambos. Las configuraciones actuales instalan por separado los registradores y los controladores. Las estaciones de control se combinan con los controladores para obtener controladores indicadores.

Mecanismo de ajuste del punto de ajuste Para cada configuración de registrador o indicador se tiene una manera distinta de manipular el punto de ajuste o referencia. En instrumentos neumáticos, casi siempre

sucede que el mecanismo de puntos de referencia ajusta un pequeño transmisor que suministra una señal de 20.7- a 103.4-kPa (3 a 15 lbf/in^2) al controlador. En instrumentos electrónicos, el ajuste consiste, casi siempre, en un potenciómetro que genera un voltaje de polaridad opuesta al de la señal de la variable de proceso.

Ajuste manual Este dispositivo manualmente operado maneja de una manera directa la señal de salida que se aplica a la válvula o el activador de válvula. Se emplea sólo cuando el controlador automático no está en servicio. La mayor parte de las salidas manuales son directamente proporcionales a la posición del dispositivo de ajuste. Sin embargo, en algunos controladores más recientes, los ajustes manuales cambian la salida, activando un mecanismo de "aumento" o "disminución".

Indicador de señal Este dispositivo indica qué nivel de señal se está aplicando a la válvula de control. Los tipos de indicadores utilizados para esto son similares a los que se emplean para indicadores de variables de proceso. Normalmente, los extremos de la escala de este medidor tienen marcado "abierto" o "cerrado", que denotan la posición de la válvula de control.

Conmutador de transferencia automático-manual El propósito del conmutador de transferencia automático-manual consiste en cambiar la fuente de la señal aplicada a la válvula. Para lograr esto sin alterar el tamaño de la señal, es decir, para lograr una transferencia sin turbulencias, los controladores más antiguos necesitan un procedimiento de balance. Cuando la conmutación se hace de la modalidad normal o automática a la manual, el dispositivo de transferencia se cambia primero a una posición intermedia o de balance y la salida del manual se iguala o compara con la salida del controlador automático. A continuación, la palanca de transferencia se pasa a la posición manual para concluir la transferencia sin perturbaciones. Luego, la salida se ajusta al valor deseado. Cuando se pasa de manual a automático, la posición de balance sirve para comparar el punto de referencia con la variable de proceso, antes de cambiar a la modalidad automática. A continuación, el punto de referencia se ajusta al valor deseado.

La posición de balance se está suprimiendo en las estaciones de control de proceso de hoy en día, y cada fabricante utiliza por lo común un patrón diferente. El método más común consiste en forzar la salida de ajuste manual para seguir la salida del controlador, mientras se encuentra en la modalidad automática, y hacer que la salida de ajuste de punto de referencia siga a la medición mientras se encuentra en manual. Así, pues, cuando se efectúa una conmutación, no es necesario realizar alguna alineación. En sistemas de control computarizado, el controlador de computadora ejecuta en forma automática los ajustes necesarios.

Punto de ajuste remoto-local Además de las cinco partes esenciales de una estación de control, la mayoría de los fabricantes presentan modelos que incluyen un conmutador remoto-local. El término "remoto-local" se refiere a la fuente de un punto de referencia o ajuste para el controlador. En la posición remota, la señal del punto de ajuste proviene de otro controlador, una estación de punto de ajuste de ubicación remota o una computadora. En la posición local, se genera mediante un ajuste de punto de referencia en la estación de control. El conmutador remoto-local se convierte en parte esencial del circuito de control cuando el controlador es el secundario de un sistema en cascada, como se ilustra en la figura 22-49. Cada fabricante suministra procedimientos especiales para efectuar la conmutación entre la posición remota y la local.

Nuevo centro de control: Algunas consideraciones de diseño Las variaciones potenciales de los centros de control tienen como única limitación la imaginación del hombre. Hay consideraciones de índole económica que reducen la cantidad de este tipo de variaciones y se está registrando cierto grado de estandarización en los centros. Hay algunas suposiciones básicas que parecen razonables en lo que respecta a los nuevos diseños de los centros de control:

1. Los centros híbridos de control con controlador normal y computadora son prácticos, cuando se tienen computadoras digitales pequeñas.

2 Varias unidades de proceso se pueden operar a partir de un centro de control, utilizando varias computadoras pequeñas o un sistema grande de computadora.

3. Cada unidad de proceso puede contar con su consola por separado o una zona específica de la consola maestra.

4. Todo el equipo de proceso comprendido dentro del espacio de la planta se puede controlar automáticamente mediante una computadora en línea.

5. Es factible montar centros de control que regulen de 1000 a 2000 circuitos individuales.

Las tareas computarizadas posibles incluyen el DDC, el control de punto de referencia, la optimización unitaria, la recolección y recuperación de datos de tendencias de circuitos de control, la recolección y recuperación de datos para contabilidad e ingeniería de procesos, la optimización entre unidades y la optimización de la planta.

Con la cantidad creciente de equipos de procesamiento que puede supervisar un solo operador, hoy en día, se están realizando grandes esfuerzos para simplificar la entrecara hombre-planta, es decir, el tablero de control. Algunos objetivos de estos esfuerzos son reducir la inversión por circuito de control, mejorar la entrecara entre el operador y las computadoras de control, hacer que la participación del operador se limite a situaciones de "control en casos excepcionales", y eliminar sistemas de alarma independientes y consolas de temperatura.

En los diagramas de flujo de tipo semigráfico, un dispositivo que ahorra espacio es la proyección óptica de pequeñas secciones del diagrama en una pantalla ubicada frente al operador. Este último elige la sección en particular que va a proyectar, utilizando un sistema de acceso aleatorio al almacenamiento de imagen.

Existe un aparato para llevar a cabo la proyección antes mencionada en la parte posterior de la superficie frontal de un tubo de rayos catódicos. En esta presentación o disposición gráfica se pueden superponer, en forma digital y en unidades de ingeniería, valores de puntos de referencia, variables del proceso, posiciones de válvula, estado automático-manual del circuito de control y condiciones de alarma. Las entradas para cambiar el estado del circuito, cambiar los puntos de referencia y hacer variar la posición de la válvula o solicitar una presentación analógica de tubo de rayos catódicos, se puede realizar mediante un teclado y/o un localizador electrónico de palanca móvil.

CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

Los controladores automáticos de procesos industriales varían desde los simples dispositivos de encendido-apagado (*on-off*) hasta los instrumentos de computación para fines especiales. Normalmente, se utilizan para acoplar la variable de proceso controlada con la variable manipulada, casi siempre mediante una válvula de control de proceso, formando un sistema de control de retroalimentación.

Los modelos comerciales difieren enormemente en muchos aspectos. En algunos casos, la entrada del controlador se conecta de una manera mecánica al indicador de la variable controlada, en donde la salida del elemento de medición es la que da la energía necesaria para este último. Algunos controladores se fabrican y montan como parte integrante de un controlador-registrador o de un controlador-indicador. Otros se montan por separado para facilitar el ensamblado del controlador en el sitio de trabajo, para incluirse en el proceso, y localizar todos los registradores e indicadores en un cuarto de control centralizado.

Para algunas aplicaciones, es probable que el elemento sensor no sea capaz de suplir la energía necesaria para activar tanto el detector de error como el elemento de control final. En estas circunstancias, es necesario proporcionar un medio para amplificar la energía suminis-

trada por el eleme
(denominado refo
cantidad de energ
grandes cantidade
tipos de reforzado
co, neumático, m
de la clase de con
uno de ellos.

CONTROLADC

Algunos sistemas
el detector de err
controlado del pr
controladores se c
de dispositivos sir
de procesos quím
vel de líquidos, as
de los controlado
de encendido-apa
porcional.
Controladore
sobresaliente de l
cantidad de acció
o la máxima disp
comúnmente en
ejemplo, el gasto
máximo, o bien d
to eléctrico de ca
encendido-apaga
vos de segurida
seguridad operac
Controladore
con la acción de
trolador proporci
operación. En c
adopta una posic
que el punto de re
controlador varía
a la desviación d
de referencia o aj
do por vapor, cu
el punto de refer
cantidad propor
vula de vapor co
aplicado. Los co
con mucha frecu
cional dependen
nipulados.

CONTROLAD

Existe un emple
ra el control de p
utilización masi
ha permitido ma
sicos reducidos,
tenga un costo g
cos. Además, lo
facilidad con las
Otra ventaja
das líneas de tra
trico para reduci
neumáticos que
los circuitos de

trada por el elemento sensor. En esencia, el amplificador de potencia (denominado reforzador o relevador de potencia) emplea la pequeña cantidad de energía generada por el elemento sensor, para controlar grandes cantidades de energía abastecida por una fuente externa. Los tipos de reforzadores o amplificadores incluyen los de tipo electrónico, neumático, mecánico e hidráulico. En la exposición que se ocupa de la clase de controlador correspondiente se darán ejemplos de cada uno de ellos.

CONTROLADORES AUTOOPERADOS

Algunos sistemas de control obtienen la energía necesaria para activar el detector de error y el elemento de control final a partir del medio controlado del proceso, a través de un elemento sensor. Este tipo de controladores se conoce como "autooperados". Por lo común, se trata de dispositivos simples que se emplean con frecuencia en las industrias de procesos químicos para controlar la presión, la temperatura y el nivel de líquidos, así como en dispositivos de seguridad. La mayor parte de los controladores autooperados se clasifican en dos categorías: los de encendido-apagado (*on-off*) (de dos posiciones) y los de acción proporcional.

Controladores de encendido-apagado (*on-off*) La característica sobresaliente de la acción de control de encendido-apagado es que la cantidad de acción de control aplicada a la entrada de proceso sea cero o la máxima disponible. La acción de encendido-apagado se emplea comúnmente en sistemas de control de temperatura, en donde, por ejemplo, el gasto de combustible suministrado al horno es cero o el máximo, o bien de la misma manera, la corriente aplicada a un elemento eléctrico de calentamiento es cero o máxima. Los controladores de encendido-apagado se emplean también, con frecuencia, en dispositivos de seguridad, como válvulas de alivio de presión y válvulas de seguridad operadas con termopar.

Controladores proporcionales Contrariamente a lo que sucede con la acción de encendido-apagado antes descrita, la acción del controlador proporcional es suave y continua a lo largo de su intervalo de operación. En condiciones de estado estacionario, el controlador adopta una posición intermedia, en donde la variable medida es igual que el punto de referencia, excepto por la compensación. La salida del controlador varía en una cantidad proporcional directa o inversamente a la desviación de la variable de proceso medida en relación al punto de referencia o ajuste. Por ejemplo, en un depósito de proceso calentado por vapor, cuando la temperatura que se desea controlar sobrepasa el punto de referencia, la salida de dicho controlador aumentará en una cantidad proporcional. Esta salida puede reducir la abertura de la válvula de vapor con el fin de que disminuya también la cantidad de calor aplicado. Los controladores proporcionales autooperados se emplean con mucha frecuencia. La linealidad y el intervalo de la acción proporcional dependen de los detalles de construcción de los dispositivos manipulados.

CONTROLADORES ELECTRÓNICOS

Existe un empleo muy difundido de los controladores electrónicos para el control de procesos. Entre las muchas razones que justifican esta utilización masiva está el desarrollo de circuitos de estado sólido, que ha permitido mayor confiabilidad, facilidad de servicio y tamaños físicos reducidos. Estos factores hacen que el controlador electrónico tenga un costo global competitivo en comparación con los neumáticos. Además, los controladores electrónicos se conectan con mayor facilidad con las computadoras de control de procesos.

Otra ventaja de los controladores electrónicos es que las prolongadas líneas de transmisión neumática se sustituyen con cableado eléctrico para reducir sustancialmente o eliminar por completo los retrasos neumáticos que, con frecuencia, degradan el buen funcionamiento de los circuitos de control neumático.

Cuando es necesario hacer una conversión de señales de voltaje o corriente eléctrica en señales neumáticas (p. ej., para poner en marcha un activador de válvula neumática) o la inversa, los transductores necesarios se pueden montar en el sitio de trabajo, es decir, localizarse cerca de la válvula o la fuente de señal neumática, con tramos pequeños de líneas neumáticas. En las subsecciones intituladas "Instrumentos indicadores y de registro" y "telemetría y transmisión", se citan ejemplos de este tipo de transductores.

Los controladores electrónicos se pueden sintonizar con mayor exactitud, los ajustes manifiestan por lo común menos deriva y hay menos partes móviles que en sus equivalentes neumáticos.

La principal desventaja de los controladores electrónicos es que se requieren diseños especiales de equipos para satisfacer requisitos de seguridad en ambientes peligrosos, con un costo adicional.

A menudo, los controladores electrónicos se montan con un instrumento que registre o indique el valor de la variable de proceso controlada, con el fin de constituir un controlador-registrador.

Amplificador operacional La base del controlador electrónico normal es un amplificador operacional de alta ganancia. Los controladores modernos admiten señales de cc en las entradas y emiten señales de cc en la salida. Si se emplean amplificadores de ca como parte del amplificador operacional, se debe incluir algún medio para transformar la señal de entrada de cc en señal de ca. Luego, en la salida del amplificador, la señal de ca se debe cambiar nuevamente a señal de cc. En la figura 22-103 se ilustra un amplificador operacional para amplificar señales de cc, utilizando un amplificador de ca.

La sección del oscilador-amplificador genera una señal de ca que tiene una frecuencia fija y una amplitud proporcional a la magnitud de la señal de entrada de cc. La etapa amplificador-detector rectifica la señal de ca generando así una señal de cc proporcional a la señal de entrada. A continuación, ésta pasa por una etapa impulsora de potencia de salida para proporcionar la señal de salida de cc. En la figura 22-103 se muestra un tipo de impulsor de potencia. Las características fundamentales de los amplificadores operacionales son una ganancia de voltaje muy elevada, impedancia de entrada muy alta y requisitos muy bajos para la corriente de entrada.

Para fines de ilustración, el amplificador operacional (ya sea que se construya en función de un amplificador de ca o de cc) puede ser como el que se ilustra en la figura 22-104, en donde R_s, que es la impedancia de entrada del amplificador y que se presenta dentro del símbolo del mismo, se omite casi siempre. Por lo común, los símbolos de tierra se omiten también. Z_1 e i_1 representan la impedancia y la corriente de entrada, respectivamente, en la red externa al amplificador. Z_f e i_f representan, respectivamente, la impedancia y la corriente de retroalimentación.

La relación entre e_s y e_{salida} (los voltajes de entrada y salida del amplificador operacional) está dada por

$$e_{salida} = -Ge_s \qquad (22\text{-}23)$$

en donde G es la ganancia del amplificador operacional. El subíndice s denota la unión totalizadora o la conexión de entrada al amplificador y el signo menos señala una inversión de polaridad de la entrada a la salida del amplificador. Según el circuito de la figura 22-104 y la ecuación (22-23), se puede determinar la relación entre $e_{entrada}$ y e_{salida}.

$$i_1 = i_f + i_s \qquad \text{Ley actualizada de Kirchhoff} \qquad (22\text{-}24)$$

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= (e_{entrada} - e_s)/Z_1 \\ i_f &= (e_s - e_{salida})/Z_f \end{aligned}\right\} \text{Ley de Ohm} \qquad (22\text{-}25)$$

$$i_s = e_s/R_s \approx 0 \qquad \text{un factor esencial de los amplificadores operacionales}$$

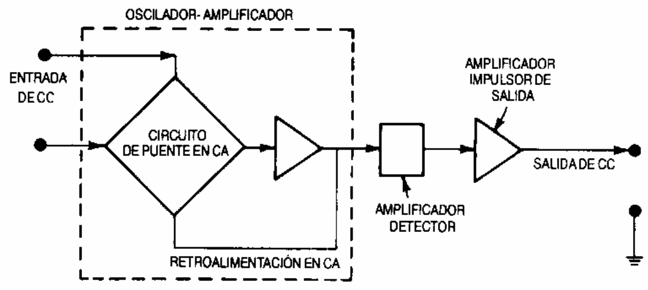


FIG. 22-103 Diagrama funcional de un amplificador operacional con amplificación de ca.

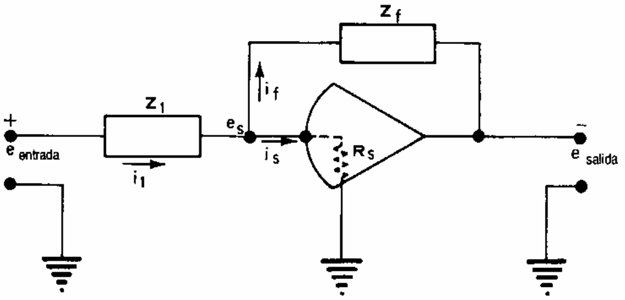


FIG. 22-104 Amplificador operacional con impedancia de entrada y retroalimentación.

Haciendo las sustituciones correspondientes en la ecuación (22-24) de i_1, i_f e i_s, así como e_s de la ecuación (22-23) se tiene

$$e_{salida} = \frac{-(Z_f/Z_1)e_{in}}{1 + (1/G)(1 + Z_f/Z_1)} \qquad (22\text{-}26)$$

Cuando G es muy grande

$$e_{salida} = -Ke_{entrada}; \quad K = Z_f/Z_1 \qquad (22\text{-}26a)$$

Las impedancias Z_1 y Z_f pueden ser resistores, capacitores o redes de resistor-capacitor, según la relación deseada entre $e_{entrada}$ y e_{salida}. Con frecuencia, Z_1 y Z_f son resistencias, en cuyo caso $Z_1 = R_1$, $Z_f = R_f$ y $K = R_f/R_1$. El valor de K puede encontrarse dentro del intervalo de 0.01 a 100 en aplicaciones típicas de controladores electrónicos.

Entradas y salidas del controlador electrónico Las señales de los controladores electrónicos aún no se han estandarizado. Para un intervalo de señal de entrada de 0 a 100%, se tienen salidas usuales de 1 a 5 mA, 4 a 20 mA, 10 a 50 mA y 1 a 5 V. La mayor parte de los controladores admiten gran variedad de señales de entrada calculando correctamente el tamaño de las resistencias de entrada, pero la salida se limita por lo común a un solo intervalo. Conviene consultar el manual de instrucción de cada fabricante.

Para aplicaciones específicas de controladores (p. ej., un controlador de presión), se acostumbra utilizar un transductor que convierte la medición física real (en este caso, presión), en una señal eléctrica. De la misma manera, si el elemento de control final es una válvula de control neumática, se emplea un transductor para convertir la señal eléctrica de salida del controlador en una señal neumática. En cualquier instalación nueva, es preciso verificar con sumo cuidado la compatibilidad del controlador electrónico con los dispositivos de medición, los elementos de control final y los transductores.

Modo de control de dos posiciones (encendido-apagado, *on-off*) El controlador de dos posiciones (llamado a veces *on-off* o *bang bang*) es, como su nombre indica, un dispositivo que tiene un nivel de salida que adopta sólo dos valores posibles. Existe gran variedad de maneras para instalar un controlador de dos posiciones y una de las más usuales es la que se describe en la figura 22-105.

La operación de este controlador se describe como sigue: cuando la diferencia entre el valor del punto de ajuste r y el valor de la variable de proceso c es negativa, la salida del amplificador e_0 tenderá a aumentar, hasta que e_0 sea ligeramente mayor que E_2. En este punto, el diodo D_2 comenzará a conducir y, con ello, evitará que e_0 aumente todavía más. Por otro lado, si $r - c$ es positiva, la salida del amplificador tenderá a disminuir hasta que e_0 sea ligeramente menor que $-E_1$, momento en que el diodo D_1 comenzará a conducir, limitando de ese modo a e_0. Existe un intervalo reducido de valores de la diferencia $r - c$ para que el voltaje de salida del amplificador adopte algún valor intermedio entre $-E_1$ y $+E_2$. La anchura de este intervalo se determina mediante la relación del valor de resistencia del diodo (en estado de polarización inversa) al valor de la resistencia de entrada R.

La salida del controlador que aparece en la figura 22-105 puede utilizarse para impulsar directamente el elemento de control final, el transductor de salida o un relevador eléctrico. Por lo común, el relevador es capaz de manejar energías superiores y su acción es análoga a la de los pilotos y relevadores neumáticos e hidráulicos.

Modo de
suministra u
el punto de
controlada.
plos comune
cadores oper
cional. En c
donde K se c
componente
de retroalim
resistencia e

En la figu
sistencias. L
Aunque los
la red de la fi
a que los cir
deriva y sólo

Controla
gar otros mo
plican bajo
cripciones q
esos modos

La acción
varias mane
cuitos básic

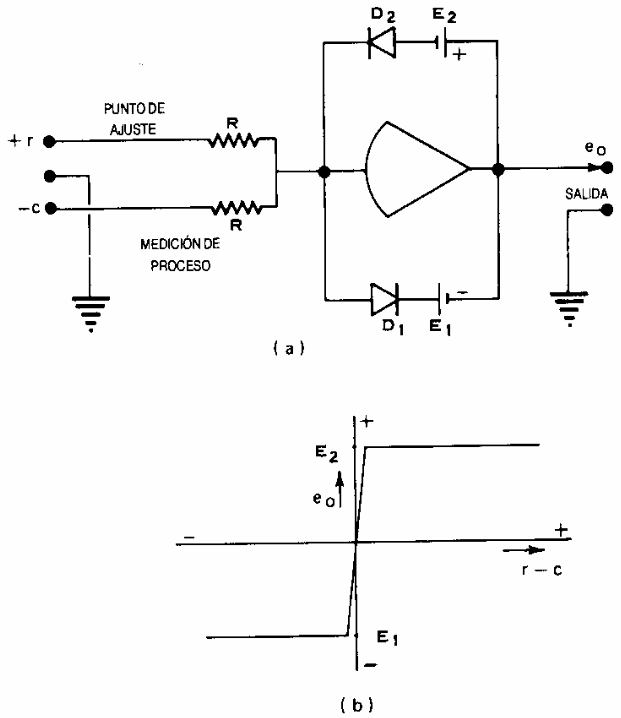


FIG. 22-105 Controlador usual de dos posiciones que utiliza un amplificador operacional en donde *a*) es el circuito básico y *b*) la respuesta de la salida a las desviaciones de la entrada en relación con el punto de ajuste.

ática. En cualquier cuidado la compatisitivos de medición,

lo-apagado, *on-off*) *on-off* o *bang bang*) ne un nivel de salida variedad de maneras a de las más usuales

mo sigue: cuando la valor de la variable e_0 tenderá a aumeneste punto, el diodo e_0 aumente todavía mplificador tenderá ue $-E_1$, momento en o de ese modo a e_0. encia $r - c$ para que valor intermedio entermina mediante la ado de polarización

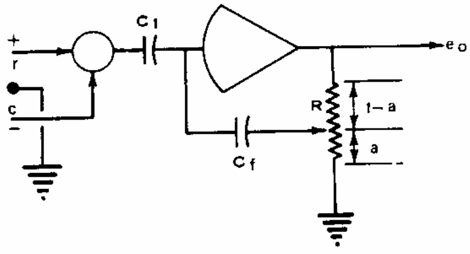
a 22-105 puede utide control final, el lo común, el relevacción es análoga a la icos.

Modo de control proporcional (P) El controlador proporcional suministra una señal de salida que es proporcional a la diferencia entre el punto de ajuste (señal de referencia) y la medición de la variable controlada. En las figuras 22-106 y 22-107 se ilustran algunos ejemplos comunes de circuitos básicos de retroalimentación para amplificadores operacionales, que se emplean para ejercer un control proporcional. En cada caso, la salida del controlador es $e_0 = -K(r - c)$, en donde K se define según la ecuación (22-26). En la figura 22-106, el componente de impedancia de entrada es un capacitor, y la impedancia de retroalimentación es una red de resistencia-capacitor, en la cual la resistencia es ajustable.

En la figura 22-107, todos los componentes de impedancia son resistencias. Los componentes de impedancia podrían ser capacitores. Aunque los tres circuitos ilustrados realizan un control proporcional, la red de la figura 22-107 es la que se utiliza más profusamente, debido a que los circuitos de capacitancia tienden a manifestar problemas de deriva y sólo son proporcionales con señales transitorias.

Controladores proporcional-integral (PI) Las razones para agregar otros modos de control al controlador proporcional básico, se explican bajo el título "Fundamentos del control automático". Las descripciones que se dan aquí tienen por objeto demostrar la forma como esos modos adicionales se pueden poner en práctica.

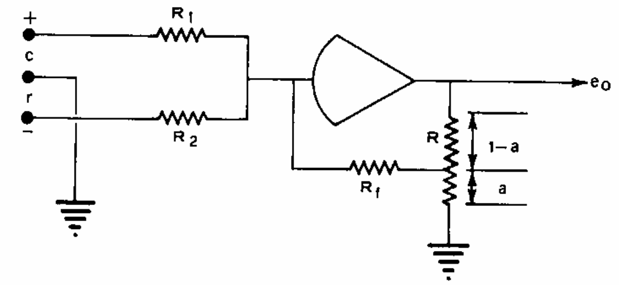
La acción integral de reposición se agrega a la red proporcional de varias maneras. En las figuras 22-108 y 22-109 se ilustran algunos circuitos básicos típicos para considerar un controlador PI.



$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} \qquad K_c = \frac{C_1}{aC_f}, \; 0 < a < 1$$

$$Z_f = \frac{1}{asC_f} \qquad e_0 = +K_c(r - c)$$

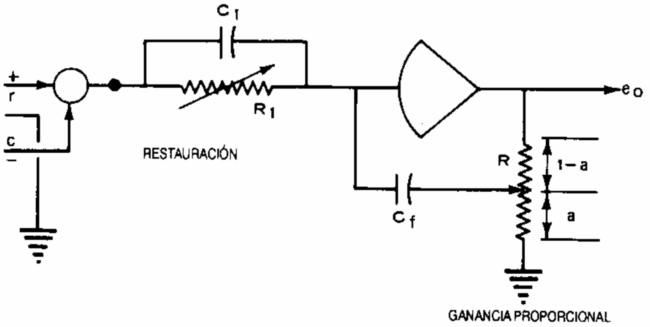
FIG. 22-106 Controlador proporcional que utiliza las capacitancias para la retroalimentación y las impedancias de entrada de la unión totalizadora. K_c es la ganancia proporcional y R la resistencia de ajuste proporcional.



$$Z_1 = R_1 \qquad K_c = \frac{R_f}{aR},\ 0 < a < 1$$

$$Z_f = \frac{R_f}{a} \qquad e_o = +K\,(r - c)$$

FIG. 22-107 Controlador proporcional que utiliza resistencias para la retroalimentación y las impedancias de entrada de la unión totalizadora.



$$Z_1 = \frac{\frac{1}{sC_1}}{1 + \frac{1}{sC_1R_1}} \qquad e_o = \frac{Z_f}{Z_1}(r - c) = K_c\left[(r-c) + \frac{1}{T_i}\int (r-c)\,dt\right]$$

$$Z = \frac{1}{asC_f} \qquad K_c = \frac{C_1}{aC_f},\ 0 < a < 1$$

$$T_i = R_1C_1$$

FIG. 22-108 Controlador proporcional-integral con redes de entrada de resistencia y capacitor para el ajuste de restauración.

Controladores proporcional-integral-derivada (PID) Es factible agregar la acción derivativa, o de rapidez de cambio, a un controlador PI, añadiendo una red de resistencia-capacitancia a la trayectoria de retroalimentación, que va de la salida del amplificador operacional a la unión totalizadora (entrada del amplificador). La función de transferencia de un controlador PID ideal es

$$E_0(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)[R(s) - C(s)]$$

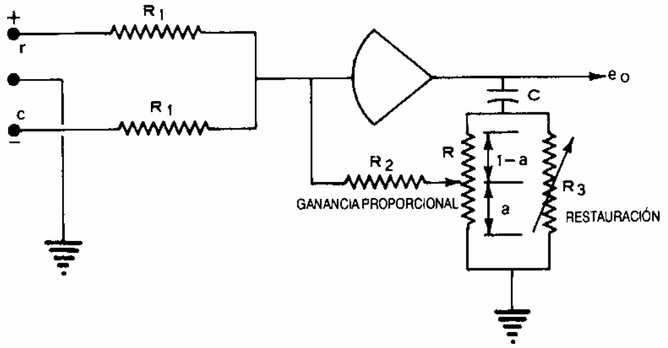
En la práctica, la verdadera acción derivativa no se logra con gran facilidad; además, es probable que no se desee tal acción, debido a que amplifica el ruido. Para minimizar el problema del ruido, se hacen modificaciones del circuito que dan como resultado la acción derivativa aproximada. En general, la acción modificada se describe mediante la expresión.

$$T_d s \rightarrow \frac{T_d s + 1}{(T_d s/\gamma) + 1} \qquad \text{y} \qquad \gamma \gg 1$$

En la figura 22-110 se ilustra un circuito básico para agregar la acción de rapidez de cambio al controlador PI.

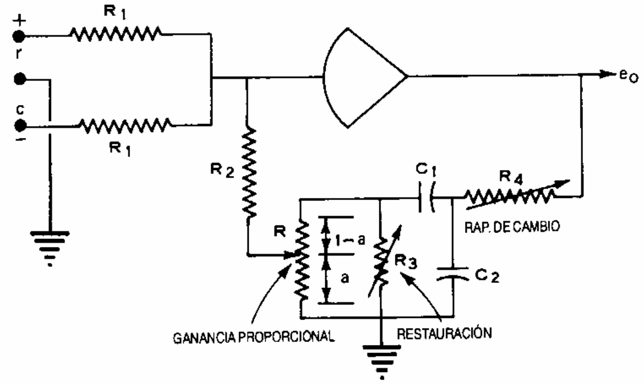
CONTROLAD

El propósito fun
aire a presión co
respuesta a una s
medida en relaci
aire es, casi siem
estandarizada po
mentos y usuario



$$K_c = \frac{R_2}{aR_1},\quad 0<a<1 \qquad T_i = R_3C$$

FIG. 22-109 Controlador proporcional-integral que utiliza una red capacitiva-resistiva de retroalimentación para realizar los ajustes de ganancia proporcional y restauración.



$$\frac{E_o(s)}{R(s)-C(s)} = K_c\left[\alpha + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right]$$

$$K_c = \frac{R_2}{aR},\quad 0<a<1 \qquad \alpha = \frac{R_3C_1+R_4C_1+R_4C_2}{R_3C_1}$$

$$T_i = R_3C_1 \qquad R \gg R_3 \gg R_4$$

$$T_d = R_4C_1$$

FIG. 22-110 Controlador proporcional-integral-derivada basado en el controlador PI de la figura 22-109.

ruido, se hacen mo-
la acción derivativa
lescribe mediante la

$\gamma \gg 1$

para agregar la ac-

CONTROLADORES NEUMÁTICOS

El propósito fundamental de un controlador neumático es abastecer aire a presión controlada a un accionador de válvula neumática, en respuesta a una señal de error basada en la desviación de la variable medida en relación con el punto de ajuste o referencia. La presión de aire es, casi siempre, del orden de 20.7 a 103.4 kPa (3 a 15 lbf/in^2), estandarizada por acuerdo ya establecido entre fabricantes de instrumentos y usuarios. El accionador de válvula es, casi siempre, un diafragma neumático, como el que se describe bajo el título de "Elementos de control final."

Existe en el mercado gran variedad de configuraciones de equipos neumáticos que producen salidas de controlador correspondientes a los modos de control de encendido-apagado, proporcional, reajuste (integral) y de rapidez de cambio (derivada). Puesto que cada fabricante posee sus propios diseños, es conveniente que se consulten los instructivos para obtener los detalles correspondientes a cada controlador particular.

Amplificadores y relevadores neumáticos El amplificador de boquilla y placa desviadora, el relevador y el piloto son unidades estructurales básicas para los controladores neumáticos.

El funcionamiento del amplificador de placa desviadora y boquilla se basa en la relación del espacio entre la placa y la boquilla y la presión opuesta resultante. En la figura 22-94 se ilustran los componentes esenciales.

El relevador neumático es un amplificador que cuenta con dos estados de salida: presión máxima y presión mínima. En la figura 22-111 se ilustra el funcionamiento de este tipo de relevador. Mediante la selección adecuada de la geometría y las dimensiones, se puede lograr que un cambio muy pequeño en la presión de entrada genere la presión de salida necesaria para cambiar la presión de abastecimiento a la atmosférica, cerrando o abriendo la válvula de alivio o escape. Los relevadores se emplean a menudo cuando hay grandes cambios de presión que se deben controlar por medio de pequeñas señales de presión; los relevadores son reforzadores de potencia.

El relevador de piloto neumático se utiliza en muchos controladores para minimizar el volumen al que se alimenta la salida del controlador. Maneja volúmenes de aire mayores que el controlador y proporciona una salida que sigue a la del controlador con gran precisión. En la figura 22-95 se ilustra un dispositivo de esta índole que es muy similar a un regulador de presión en el que el punto de referencia es la señal de salida del controlador.

Los pilotos neumáticos son otro tipo de amplificador de potencia. En la figura 22-112 se muestra la forma como una pequeña fuerza aplicada al eje del piloto genera una fuerza mayor. Un pequeño movimiento del eje del piloto hacia la derecha abre el conducto del mismo que lleva el lado derecho del pistón de potencia y purga el lado izquierdo del pistón, haciendo que éste se desplace hacia la izquierda. De la misma manera, al mover el eje del piloto hacia la izquierda, produce un movimiento del pistón hacia la derecha. La fuerza proporcionada por el pistón se determina mediante la presión del abastecimiento de aire y el área del pistón.

Puesto que el tamaño de los orificios de la válvula del piloto que comunican al cilindro de potencia pueden ser proporcionales al desplazamiento de medición, la velocidad con que se mueve el pistón de potencia se relaciona con el desplazamiento de medición de los carretes. Esta combinación puede utilizarse como controlador flotante (sólo de restauración o reajuste).

Control de dos posiciones (encendido-apagado, *on off*) El controlador de dos posiciones [llamado también *on-off*] se utiliza cuando el objetivo es suministrar ya sea una presión máxima o mínima a la válvula de diafragma de un motor. Este tipo de acción mueve la válvula para dejarla en una posición totalmente abierta o totalmente cerrada.

Para un punto de referencia determinado, un aumento en la presión de la señal de medición hace que la placa desviadora se mueva hacia la boquilla, incrementando con ello la presión opuesta dentro de la boquilla. Esta presión opuesta incrementada expande el fuelle del rele-

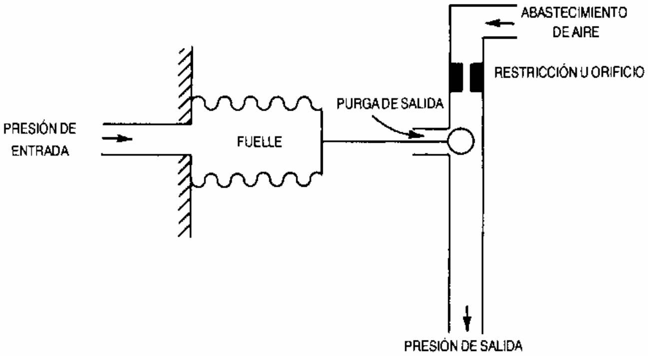


FIG. 22-111 Relevador neumático.

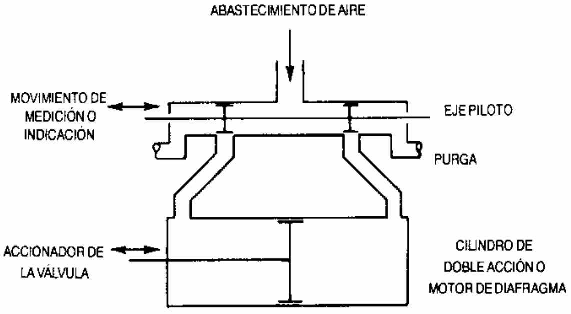


FIG. 22-112 Válvula piloto de tipo neumático y cilindro de doble acción.

vador, abriendo
salida del contro
presión atmosfér
Control prop
presión de salida
medición de la v
ajuste. En la figu
fuelle de reajuste
Una reducción
de balanza se de
ciendo así la pre
lla reduce la pre
brazo por medio
del movimiento
de una retroalim
una posición tal
porción con la d
dición y el resor
la presión de sal
móvil del brazo.
la boquilla, tanto
otra manera, el c
Control pro
de reajuste (o i
adición de un fu
ble. En la figura
proporcional m
más reajuste es
zo de la balanza
presión de salid
hace que el fue
estabilice la sal

icador de potencia.
ɩequeña fuerza apli-
ɩequeño movimien-
ɪcto del mismo que
ja el lado izquierdo
:quierda. De la mis-
ˌuierda, produce un
. proporcionada por
ıstecimiento de aire

vula del piloto que
ıporcionales al des-
mueve el pistón de
ɜdición de los carre-
ɔlador flotante (sólo

ado, *on off*) El con-
ff) se utiliza cuando
ɩima o mínima a la
ón mueve la válvula
otalmente cerrada.
mento en la presión
ra se mueva hacia la
sta dentro de la bo-
le el fuelle del rele-

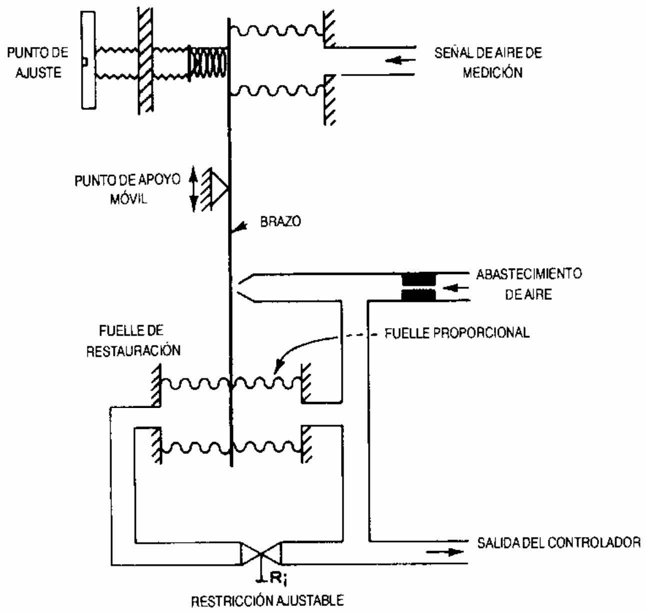


FIG. 22-113 Controlador neumático proporcional-integral.

vador, abriendo así el conducto de alivio del relevador. La presión de salida del controlador cambia el valor de abastecimiento hasta casi la presión atmosférica.

Control proporcional (P) El controlador proporcional genera una presión de salida que es proporcional a la diferencia entre la presión de medición de la variable de proceso y la fuerza de resorte del punto de ajuste. En la figura 22-113 se ilustra este tipo de controlador, pero sin fuelle de reajuste y su restrictor.

Una reducción de la presión del aire de medición hace que el brazo de balanza se desplace, alejándose de la abertura de la boquilla reduciendo así la presión opuesta de la misma. La menor presión de boquilla reduce la presión de salida del controlador y la fuerza aplicada al brazo por medio del fuelle proporcional, con lo cual se compensa parte del movimiento del brazo provocado por el fuelle de medición. Se trata de una retroalimentación negativa, de donde, la varilla o brazo adopta una posición tal que la presión de salida del controlador varía en proporción con la diferencia en las fuerzas ejercidas por el fuelle de medición y el resorte del punto de referencia. La magnitud del cambio en la presión de salida se determina según la posición del punto de apoyo móvil del brazo. Cuanto mayor sea la distancia entre el punto de apoyo y la boquilla, tanto mayor será el cambio en la presión de salida: dicho de otra manera, el controlador tiene una ganancia proporcional más alta.

Control proporcional y de reajuste (PI) La adición de la acción de reajuste (o integral) a un controlador proporcional comprende la adición de un fuelle de reajuste o restauración y una restricción ajustable. En la figura 22-113 se muestra un ejemplo usual de controlador proporcional más reajuste. La acción de un controlador proporcional más reajuste es como sigue: si aumenta la presión de medición, el brazo de la balanza se mueve hacia la boquilla, incrementando con ello la presión de salida del controlador. La presión de salida incrementada hace que el fuelle proporcional reestablezca la posición del brazo y estabilice la salida a una presión mayor. Ahora se tiene una caída de presión en la restricción R_i. Conforme penetra un pequeño flujo de aire en el fuelle de restauración, obliga al brazo a moverse hacia la boquilla, incrementando más aún la presión de salida.

Si este controlador es del tipo de circuito cerrado, la presión de salida se mantendrá por encima de un valor de estado estacionario, hasta que la presión de medición se impulse de tal manera que se iguale con el punto de referencia. La presión de salida se estabiliza a cualquier presión necesaria para mantener la medición en el punto de ajuste, eliminando la desviación que sigue a los cambios de carga o del punto de referencia.

Si el proceso no regresa al punto de referencia o se interrumpe el circuito de retroalimentación de medición, el aumento en la presión del fuelle de medición hace que la salida aumente de manera proporcional y, entonces, aumenta con lentitud hasta el límite del abastecimiento de aire. Esta situación se conoce como "preparación previa al reajuste". Antes de que se pueda restaurar al modo de control automático, esta presión debe purgarse nuevamente hasta R_i. El tiempo de purga se puede reducir abriendo la restricción, hasta que las presiones de los fuelles de reajuste y el proporcional se hayan igualado, y la presión de salida disminuya hasta que quede dentro del intervalo de control normal, y luego se cierra para que quede en el ajuste de restricción original.

Control proporcional más rapidez de cambio (PD) La acción proporcional más rapidez de cambio (derivada) se obtiene con la configuración ilustrada en la figura 22-114). Si se coloca una restricción ajustable R_d entre el fuelle proporcional y la salida del controlador, se obtendrá una acción proporcional retardada. Esta operación se describe de la siguiente manera: supóngase que la señal de medición aumenta en forma lineal con el tiempo (una rampa). El brazo se mueve lentamente hacia la boquilla y aumenta la presión de salida. El aire fluye con lentitud a través de la restricción R_d para restaurar la posición del brazo y la boquilla. Debido al tiempo requerido para que el aire pase por la restricción, la acción proporcional se reduce temporalmente y sufre un retraso. Por lo tanto, la salida es mayor y avanza más en el tiempo de

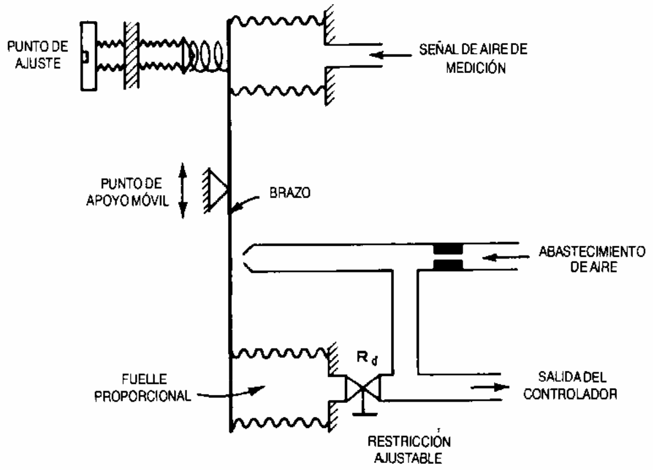


FIG. 22-114 Controlador neumático proporcional-derivada.

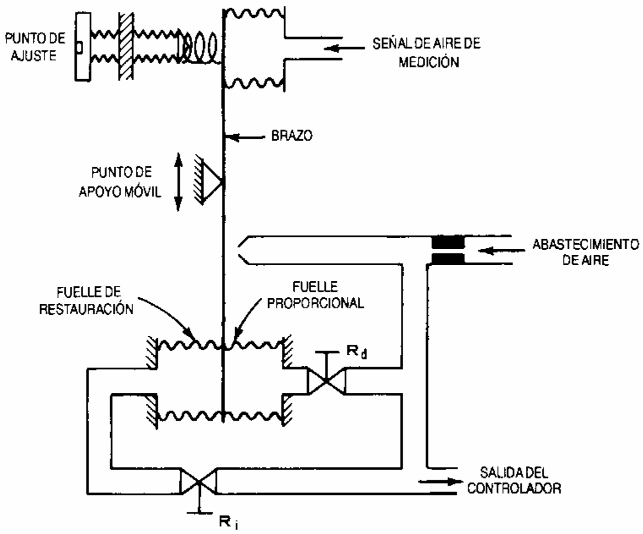


FIG. 22-115 Controlador neumático proporcional-integral-derivada.

lo que sucedería si sólo se contara con el control proporcional. Hasta este grado, la salida del controlador lleva un adelanto en relación con la entrada de medición. La magnitud de la salida es proporcional a la rapidez de cambio de la señal de medición.

Control proporcional más reajuste más rapidez de cambio (PID) Como indica su nombre, el controlador PID es una combinación de los tres modos de control antes citados. En la figura 22-115 se ilustra una configuración usual de tres modos.

Las configuraciones que aparecen en las figuras 22-113 a la 22-115 no son estándares. Cada fabricante posee sus propios diseños, pero entre las variaciones comunes están: **1)** en algunos diseños se utiliza un relevador de piloto neumático entre el controlador y la salida que va al accionador de la válvula, para reducir el volumen del aire que se debe suministrar a través de las restricciones dentro del controlador, **2)** algunas aplicaciones requieren un controlador de acción inversa; en otras palabras, la salida del controlador disminuye cuando aumen-

ta la señal de m
proporciona uti
ción ajustable,
porcional) se h
de apoyo móvil
Controlado
critos en los p
diversas config
una configurac
se deriva del h
un módulo sob
acción global d
se ilustra en la f
do el controlad
equipo de proc

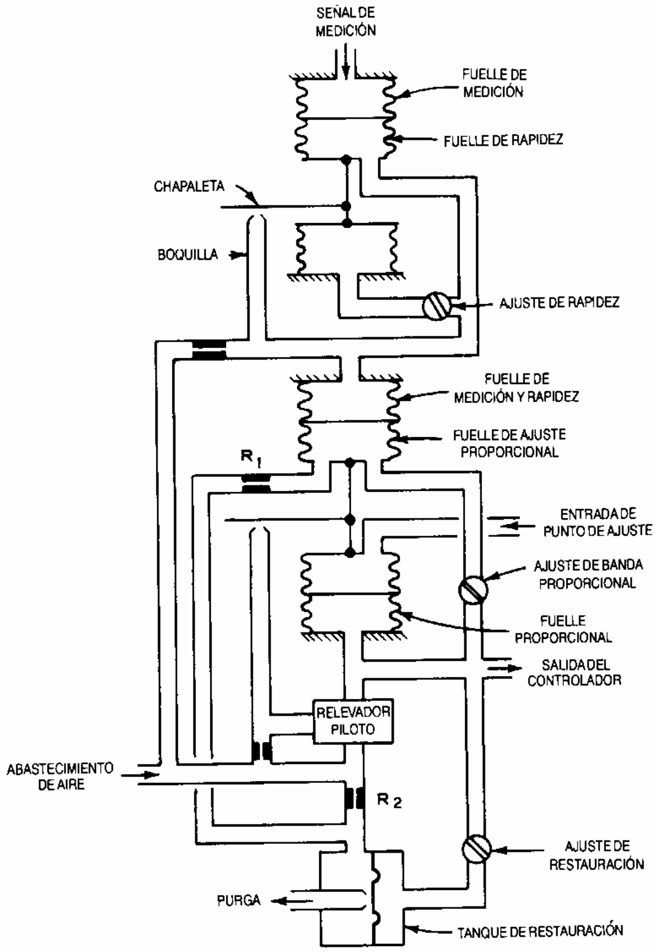


FIG. 22-116 Diagrama esquemático de un controlador neumático ciego tipo estante.

ta la señal de medición, 3) en algunos diseños, el punto de ajuste se proporciona utilizando un fuelle de punto de referencia y una restricción ajustable, 4) el ajuste de la ganancia proporcional (o banda proporcional) se hace con una restricción ajustable, en lugar de un punto de apoyo móvil.

Controlador tipo estantería Los controladores neumáticos descritos en los párrafos anteriores se pueden fabricar siguiendo muy diversas configuraciones de equipo. En la figura 22-116 se muestra una configuración usual del controlador tipo estantería. Su nombre se deriva del hecho de que éste se ensambla montando literalmente un módulo sobre el otro, y cada módulo ejecuta una porción de la acción global de control. El orden de colocación puede diferir del que se ilustra en la figura. Este tipo de equipo se emplea, sobre todo, cuando el controlador se localiza alejado del cuarto de control y cerca del equipo de procesamiento.

En esta ilustración, el ajuste de la ganancia proporcional se logra como se sugiere en el punto 4) del párrafo anterior, y la señal de punto de referencia se suministra como se sugiere en la variación 3). La acción de reajuste se produce por medio del tanque de restauración, el ajuste de restauración y las restricciones R_1 y R_2.

Véase, por ejemplo, un incremento en la presión del punto de referencia, que provoca una reducción en la presión de boquilla y un aumento en la presión de salida del controlador. La mayor presión de salida, retardada por la restricción de ajuste de restauración, obliga al diafragma del tanque de restauración a cerrar la purga. Esto suministra aire que pasa por R_2 y R_1, que basta para hacer aumentar la presión en el fuelle proporcional de retroalimentación positiva, hasta que la presión entre R_2 y R_1 en el tanque de restauración se equilibra con la presión del tanque de restauración, suministrada por la salida del controlador a través de la restricción de ajuste de restauración. En la figura 22-116,

ı22-113 a la 22-115
ɔpios diseños, pero
ıs diseños se utiliza
ador y la salida que
ımen del aire que se
tro del controlador,
· de acción inversa;
uye cuando aumen-

los fuelles indicados corresponden a ilustraciones anteriores; sin embargo, esta clase de controlador se construye casi siempre basándose en una serie de diafragmas, en lugar de fuelles.

CONTROLADORES DE MICROPROCESADOR

Desde que se introdujeron los microprocesadores en 1971, su empleo se ha incrementado en diversas aplicaciones, entre las que se encuentran las referentes al control de procesos. En la mayor parte de estas aplicaciones, el microprocesador se incorpora en un sistema (p. ej., medidores de flujo de masa, transportadores de datos, controladores de carga y de procesos continuos) en el que no es necesario el conocimiento del microprocesador por parte del usuario y hasta es posible que no tenga conocimiento de la existencia de un microprocesador en el sistema. En otras aplicaciones, el usuario puede adquirir un sistema de microprocesamiento y desarrollar el sistema de programas de control (*software*) para un uso específico.

Conceptos generales Antes de iniciar la discusión sobre las aplicaciones de los microprocesadores en el control de procesos es necesario definir qué es un microprocesador. Se trata de un dispositivo semiconductor capaz de ejecutar operaciones aritméticas, lógicas y de toma de decisión, bajo el control de un conjunto de instrucciones almacenadas en la memoria. De manera esencial se trata de un manipulador de datos digitales de propósito general (computador) con un programa almacenado. En un microprocesador, todos los elementos de un minicomputador se han reproducido en circuitos integrados a gran escala. A diferencia de otros tipos de circuitos lógicos digitales que no son flexibles por la forma en que son programados, las funciones lógicas del microprocesador se programan mediante un conjunto de instrucciones almacenado en la memoria. Los microprocesadores pueden responder a las variaciones de datos de entrada con programas alternativos. Esta flexibilidad hace que el microprocesador sea un componente útil para las diversas partes de equipos de control.

Un microprocesador contiene los elementos de un microcomputador; además, la estructura (método empleado para la organización de los elementos de control) del microprocesador es similar a la estructura de las minicomputadoras clásicas. Las cuatro partes básicas de un microcomputador son la unidad lógica aritmética, unidad de memoria, secciones de entrada-salida y la unidad de control.

La unidad lógica aritmética ejecuta las funciones lógicas y las operaciones aritméticas dentro del microprocesador. La memoria se emplea para el almacenamiento de datos y programas. La memoria puede ser del tipo de lectura o de lectura-escritura. La memoria del tipo de lectura no puede ser modificada por el microprocesador. Las secciones de entrada y salida son los medios de que se vale el microprocesador para su comunicación con el mundo externo. Estas secciones pueden detectar y manipular diversos dispositivos, como interruptores, luces, teletipos, unidades de cinta magnética o de papel, convertidores analógico a digital o digital a analógico y comunicadores.

La unidad de control interpreta el programa almacenado y las secciones también coordinan el flujo de información dentro del microprocesador y el tiempo empleado para que ocurra dicho flujo.

En la figura 22-117 se muestra un esquema de microprocesador usual. Aunque la mayor parte de los microprocesadores contienen estos elementos, existen variaciones en la cantidad y dimensión de los registradores y su interconexión, dependiendo del microprocesador específico. Las dimensiones de los registradores (acumuladores), determinan las dimensiones del microprocesador. Estas dimensiones varían desde un *bit* en algunos microprocesadores de empleo específico, utilizados en controladores programables, hasta 16 *bits* para los microprocesadores de propósito general. Los microprocesadores más comunes para aplicaciones en el control de procesos son los de 4 y 8 *bits*.

En la figura 22-118 se muestra cómo se encuentra organizado un controlador basado en un microprocesador. La medición del proceso en forma de señales eléctricas analógicas se aplica como entrada al convertidor analógico a digital. Estos datos analógicos son convertidos, bajo el control del programa del microprocesador, en la forma

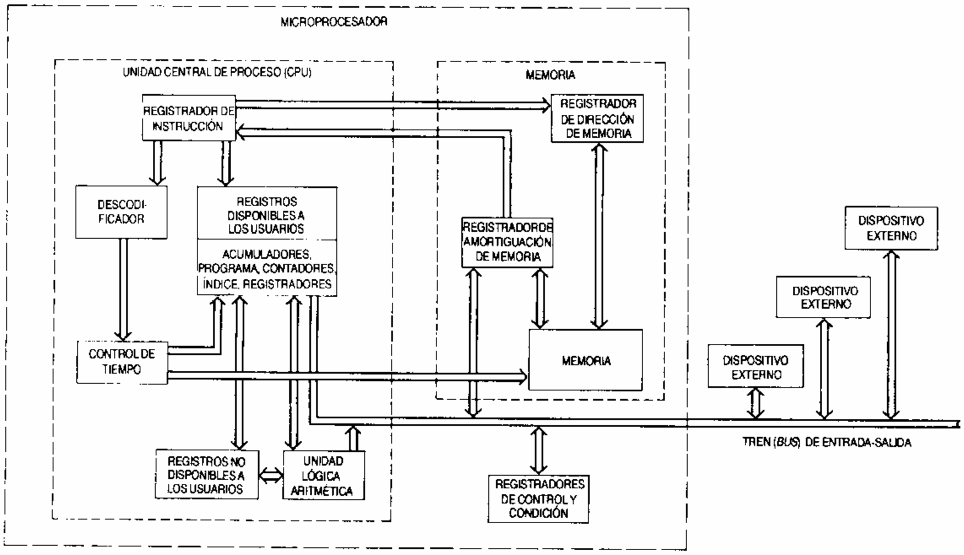


FIG. 22-117 Estructura usual de un microprocesador.

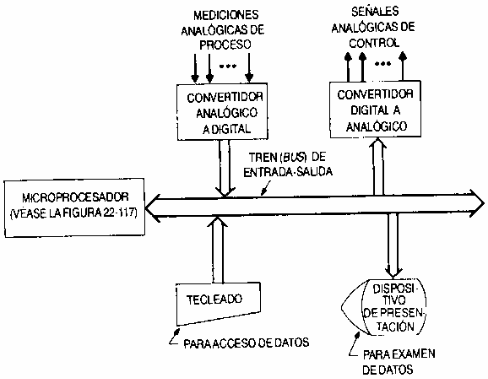


FIG. 22-118 Controlador basado en un microprocesador.

digital y así se almacenan en la memoria del microprocesador. Otro segmento del programa de control selecciona los datos necesarios contenidos en la memoria, calcula el valor de salida y transfiere este valor al convertidor digital a analógico. En este convertidor, la señal eléctrica es emitida de manera analógica, adecuada para que llegue a un dispositivo de punto final, como las válvulas de control.

Los cambios que el operador introduce, por ejemplo, un nuevo valor del punto de ajuste, se efectúan mediante el teclado con datos presentados sobre el dispositivo de presentación alfanumérica. La combinación pantalla-tecleado puede emplearse para examinar los valores de las entradas y salidas analógicas y, en algunos casos, cambiar el programa de control.

Los controladores analógicos se limitan casi siempre a controladores de acción proporcional, proporcional-integral o proporcional-integral-derivada (PID), con constantes fijas de ajuste. Cualquier cambio en la estrategia de control requerirá un cambio en la estructura (*hardware*) del equipo analógico. Los algoritmos de control para los microprocesadores se pueden escribir para cualquier acción de control que se desee; sin embargo, la PID estándar y algunas variaciones del algoritmo PID son los únicos que se encuentran disponibles en paquetes de programación (*software*) estándar. Se podría incluir una derivación del algoritmo PID en un controlador basado en un microprocesador. Esta derivación se analiza en los siguientes párrafos.

Algoritmos Como el microprocesador es un dispositivo digital que opera con muestreo de datos discretos a una velocidad conocida, es posible escribir las ecuaciones que minimicen la acción del circuito de control analógico.

El algoritmo que describe la acción de un controlador PID puede derivarse a partir de la definición del PID. Por definición, la salida se ve afectada por tres términos: uno es proporcional a la señal de error, otro es la integral de la señal del error, el último es la derivada de la señal del error. Para ser congruente con el circuito analógico que aplica la ganancia a los tres términos del error, el algoritmo debería escribirse también de tal manera que las acciones integral y de reajuste o restauración se vean afectadas por el establecimiento de la ganancia. Es posible escribir un algoritmo más sencillo cuando la restauración y la rapidez de cambio o velocidad son independientes de la ganancia. Con base en esta definición, la salida de un controlador analógico se iguala a la suma de los tres términos, es decir,

Salida = término proporcional + término integral + término derivado

$$= G_1 e + G_2 \int e\,dt + G_3 \frac{de}{dt} \qquad (22\text{-}27)$$

donde, salida = señal enviada hacia la válvula o el elemento final de control

G_1 = término de ganancia del controlador
G_2 = término integral o de reajuste del controlador
G_3 = término derivativo o de velocidad del controlador
e = error o diferencia entre la señal del proceso y el punto de ajuste del controlador

Como el microprocesador opera sobre números discretos, la integral se sustituye por una sumatoria y la diferencial se sustituye por una diferencia. Como la velocidad de muestreo es pequeña, comparada con las constantes de tiempo del proceso, no se introduce algún error significativo. La ecuación (22-27) llega a tener la siguiente forma:

$$\text{Salida} = G_1 e_n + G_2 \sum_{k=0}^{n} e_k + G_3 (e_n - e_{n-1}) \qquad (22\text{-}28)$$

donde, $e_n = s_n - p_n$, error al tiempo n
p_n = señal del proceso al tiempo n
s_n = valor del punto de ajuste al tiempo n

Entonces, $e_n - e_{n-1} = p_n - p_{n-1}$, puesto que $s_n = s_{n-1}$.

Es posible introducir una constante Q_k en el término integral con objeto de prevenir el problema de restauración que se presenta en los controladores analógicos; entonces

$$\text{Salida} = G_1 e_n + G_2 \sum_{K=0}^{n} (Q_k e_k) + G_3 (p_n - p_{n-1}) \qquad (22\text{-}29)$$

donde $Q_k = 1$, si el valor de salida está dentro de los límites definidos
$= 0$, si la salida excede los límites.

Los términos de ganancia se reescriben, para corresponder con los términos de ganancia, restauración y de velocidad como se emplean en los controladores analógicos:

$$\text{Salida} = K_g \left[e_n + \frac{T_s}{T_i} \sum_{K=0}^{n} (Q_k e_k) + \frac{T_d}{T_s} (p_n - p_{n-1}) \right] \qquad (22\text{-}30)$$

donde, p_n = señal del proceso en el n-ésimo periodo de muestra
$e_n = S - p_n$
S = punto de ajuste
Q_k = 1, si el valor de salida se encuentra dentro de los límites
= 0, si el valor de salida se encuentra fuera de los límites
T_s = tiempo de muestreo
T_i = término de restauración
T_d = término de velocidad
K_g = término de ganancia proporcional

Este es sólo uno de los múltiples algoritmos de control que es posible tener. Entre otros algoritmos se encuentran los siguientes: **1)** PID, con error cuadrático en la integral; **2)** PID, con error cuadrático en la ganancia; **3)** controladores de vacío, donde no ocurre algún cambio en la salida hasta que se excede el límite de error predefinido; y **4)** controladores de vacío en los que sólo se controla la acción integral hasta que se excede el límite de error predefinido.

Casi todos los algoritmos que existen en los paquetes de *software* se basan en el controlador PID de tres modos. A pesar de esto, se encuentra disponible una amplia variedad de condiciones de entrada (proporciones, diferencia, raíz cuadrada, multiplicador, etc.).

Ajuste adaptable La mayor ventaja de algunos circuitos de control es la capacidad de ajuste adaptable de un controlador basado en un microprocesador. Este ajuste adaptable es la habilidad para cambiar de manera automática las constantes de ajuste de un controlador de retroalimentación. La forma más común de este ajuste es el control de ganancia adaptable, limitado en forma previa a los circuitos de control en un computador de control de proceso. El controlador basado en un microprocesador ha extendido la posibilidad del control de ganancia adaptable a todos los circuitos de control.

Las cuatro áreas mayores de aplicación del control de ganancia adaptable son las siguientes:

1. Circuitos de control que requieren un control más sensible y más estricto en un punto de ajuste específico.

2. Circuitos de control que requieren un control sobreamortiguado en un punto de ajuste específico.

3. Circuitos de control que requieren cambios de ganancia con base en una entrada externa, para proporcionar los cambios en las constantes de ajuste con base en el arranque, al tipo de evento y al tiempo de duración del mismo.

4. Circuitos de control cuando la ganancia del proceso es no lineal.

Control más sensible y más estricto Las razones para desear un control más estricto en algunos circuitos son obvias. Los circuitos con ganancia adaptable fueron los primeros en utilizarse. Las desviaciones en el proceso respecto al punto de ajuste se pueden disminuir al incrementar la ganancia del controlador, pero la estabilidad también disminuye al incrementar la ganancia. Si la ganancia del controlador se incrementa como una función de la desviación del proceso respecto al punto de ajuste, es posible establecer un punto intermedio en el que la desviación se reduce sin que el circuito sea forzado a oscilar.

Control sobreamortiguado Aunque en principio no parezca obvio por qué se desea un control sobreamortiguado, existen diversas aplicaciones en las que su existencia es benéfica. Dos aplicaciones posibles son la reducción de la acción del controlador causada por el ruido del proceso o la medición y la reducción de las interacciones del circuito de control.

Las etapas previas utilizadas para reducir las interferencias o ruido del proceso y la medición incluyen la amortiguación del transmisor y el ajuste del controlador para bajas ganancias y altos índices de restauración. Estas etapas reducen la acción del controlador debido al ruido, pero también reducen la respuesta a las desviaciones reales del proceso. El ajuste adaptable permite que la ganancia del controlador sea baja en la región del punto de ajuste, con ganancias mayores al incrementarse las desviaciones.

El control de ganancia adaptable puede emplearse para reducir las interacciones de los circuitos de control causadas por el acoplamiento de procesos en paralelo y en serie. Un problema usual en las plantas de procesamiento en las que el equipo se opera en paralelo (calentadores, calderas, generadores, compresores de refrigeración o un tren completo de proceso) es que las perturbaciones de una unidad se unen a todas las demás unidades. Un método que se aplica para romper el acoplamiento de los circuitos de control para prevenir las perturbaciones de las unidades en paralelo es reducir gradualmente la acción del controlador. Sin embargo, como en el ejemplo anterior, el control sobreamortiguado causa mayores desviaciones y tiene una recuperación más lenta. La desviación de la máxima desviación puede reducirse con el ajuste adaptable, al reducirse la amortiguación conforme disminuye la desviación.

Otro ejemplo de cómo puede reducirse la interacción del circuito de control es mediante el control de la alimentación que entra a una unidad de procesamiento, como una torre de fraccionamiento. Para la operación uniforme de unidades, la velocidad de alimentación debería ser tan constante como fuera posible. Un método común para controlar la velocidad de alimentación a una torre de fraccionamiento emplea el controlador de nivel en el fondo de la torre anterior. El fondo de esta torre se puede utilizar como un tanque de oleaje para suavizar cualquier variación en el flujo de alimentación, cuando se permite una variación en el nivel dentro de un intervalo específico. En este ejemplo, el ajuste adaptable se emplea como un controlador de vacío con la ganancia del controlador como función de la señal de nivel.

Cambios de ganancia basados en entradas externas La capacidad para cambiar la ganancia del controlador de manera automática, sobre la base de unas entradas externas basadas en el arranque, el tipo de operación o la duración de la operación misma, tiene pocas aplicaciones en las industrias de procesos continuos; pero el mayor potencial para la aplicación de este concepto se encuentra en los procesos por cargas o lotes (*batch*), y debería aplicarse a procesos por cargas que requieren arranque no sobremaximizado y control estricto y uniforme a través del lote o carga.

Ganancia en procesos no lineales El ajuste adaptable tiene aplicaciones en circuitos de control cuando la función de transferencia del proceso es no lineal. Esta no linealidad puede ser originada por las no linealidades de las características del proceso, como el control del pH (neutralización ácida o básica) o puede ser el resultado de un amplio intervalo de cargas o puntos de ajuste. La finalidad del ajuste adaptable en esta aplicación sirve para mantener el producto de la ganancia del proceso y la ganancia del controlador en un valor constante.

Un ejemplo de ganancia en procesos no lineales es la aplicación de válvulas de intervalo dividido. Las dos válvulas pueden ser muy diferentes respecto a sus características y tamaño. Para compensar los cambios en las características de las válvulas, la ganancia del controlador puede ajustarse como una función de la salida del controlador.

Aplicaciones adicionales Los microprocesadores también se pueden aplicar para el control de la operación de un sistema completo dentro de una unidad del proceso. Como ejemplo de esto, considérese un sistema microprocesador de diseño especial que podría controlar la operación de una caldera. Este sistema sería responsable de rastrear (monitorear) el estado de los interruptores de seguridad, accionar las válvulas de control para controlar la presión de vapor, el nivel en el tambor, etc., optimizar la eficiencia de la caldera a través de un ajuste de la relación combustible-aire y controlar la secuencia y duración del arranque. Estas unidades de control de diseño muy especial podrían adquirirse como un sistema de microprocesamiento y no sólo como parte de un sistema (*hardware*) que contiene un microprocesador. En este tipo de sistemas, el usuario final tiene acceso a la programación de la unidad y puede ser responsable de la generación del programa de control.

SIMPLIFICACIÓN LÓGICA DE SISTEMAS DE CONTROL

Un árbol de fallas es una lista de criterios que tienen relaciones lógicas, que deben cumplirse antes de poder alcanzar una meta específica. Si la meta es poner en funcionamiento un automóvil que cuenta con transmisión automática, el árbol de fallas consistirá en colocar la transmisión en punto neutral o de estacionamiento, introducir la llave en el punto de ignición y hacerla girar para el arranque. Desde luego que existen otras previsiones, como reducir la presión sobre el acelerador y conservarla sobre el freno, pero es posible poner en funcionamiento el automóvil sin llevar a cabo estos pasos con anterioridad, puesto que no se encuentran contenidos en el árbol de fallas del automóvil de referencia. Un árbol de fallas se forma con funciones binarias como un interruptor de luz que se enciende o apaga, los interruptores de velocidad, presión, nivel o flujo, que sólo tienen dos posiciones para encontrarse arriba o abajo del punto de ajuste, o un interruptor de vibración que es cerrado u obstruido. Los árboles de fallas se construyen con funciones binarias y las soluciones o notaciones se entienden mejor a través del álgebra booleana.

Álgebra booleana Las ecuaciones booleanas se escriben utilizando los símbolos + para OR y · para AND. Sólo existen dos respuestas posibles, 1 y 0. En una ecuación OR, cuando cualquier entrada es 1, la salida será 1. En una ecuación AND, todas las entradas deben ser 1, si se pretende que la salida sea 1. Para el caso del arranque o puesta en funcionamiento del automóvil, el árbol de fallas será (neutral + estacionamiento) · girar la llave para el arranque = automóvil encendido. Si se le asigna la letra N a la transmisión en neutral, P a la transmisión de estacionamiento, S a la ignición para el arranque y SC al arranque del automóvil, la ecuación anterior podría expresarse como $(N + P) \cdot S = SC$. Las funciones que se emplean son binarias, asignando el valor 0 a cada función que no se encuentre en el estado requerido para tener la salida deseada; por ejemplo, el interruptor de ignición no ha sido girado para que se encuentre en el punto de ignición, $S = 0$. A cada función se asigna el valor 1 cuando ya se encuentra en la condición deseada. Si la transmisión está en el punto de estacionamiento y el interruptor de ignición ya ha sido girado hasta el punto de arranque, $N = 0$, $P = 1$ y $S = 1$. Por adición lógica, se tendrá $0 + 1 = 1$ y $1 \cdot 1 = 1$; en conclusión, el automóvil debería arrancar. Una barra (línea) encima de la función denota que la función está en posición NOT; por ejemplo, si $N = 1$, entonces $\overline{N} = 0$, $\overline{0} = 1$, y $\overline{1} = 0$. Para simplificar un árbol de fallas se utilizan las siguientes leyes booleanas:

$A + A = $ …
$A \cdot A = A$ …
$A + B = $ …
$A \cdot B = B$ …
$(A + B) +$ …
$(A \cdot B) +$ …
$A \cdot (B +$ …
$A + B \cdot C$ …
$A + 1 = 1$ …
$A \cdot 1 = A$ …
$A + 0 = $ …
$A \cdot 0 = 0$ …
$\overline{A} + A = $ …
$\overline{A} \cdot A = 0$ …
$\overline{A \cdot B} = \overline{A}$ …
$\overline{A + B} = $ …
$A \cdot B = \overline{A}$ …
$\underline{A} + B = $ …
$\overline{\overline{A}} = A$

En el ejemplo ante… tomóvil, la transmi… estacionamiento o… el interruptor de ar…

S…
S…

Es del conocimi… automóvil no pued… mismo tiempo. Ot… 0, y cuando $N = 1$,… ecuación, la cambi… booleana $A \cdot A = A$,… ción se reduce a la… definida de maner… ciones posibles de… a $SC = S \cdot (N + P)$.

Supóngase que… encima de un pun… punto de referenci… bomba también n… encuentre por enci… $(P = A \cdot C)$. Cuand… encima de los resp… la bomba ($P = B \cdot$… ción de la bomba,… que se reduce med… empleo de las leye… celarse en esta ecu… ba o abajo de su p…

ıltado de un amplio
del ajuste adaptable
› de la ganancia del
constante.
ı es la aplicación de
ıeden ser muy dife-
'ara compensar los
anancia del contro-
la del controlador.
adores también se
n sistema completo
le esto, considérese
ue podría controlar
esponsable de ras-
e seguridad, accio-
n de vapor, el nivel
ldera a través de un
· la secuencia y du-
iseño muy especial
ɔsamiento y no sólo
e un microprocesa-
accesu a la progra-
: la generación del

DE CONTROL

ıelaciones lógicas,
meta específica. Si
ue cuenta con trans-
colocar la transmi-
ducir la llave en el
e. Desde luego que
sobre el acelerador
en funcionamiento
ioridad, puesto que
el automóvil de ref-
s binarias como un
rruptores de veloci-
iciones para encon-
ruptor de vibración
se construyen con
: entienden mejor a

e escriben utilizan-
sten dos respuestas
uier entrada es 1, la
adas deben ser 1, si
ranque o puesta en
erá (neutral + esta-
omóvil encendido.
, P a la transmisión
ıe y SC al arranque
se como $(N + P) \cdot S$
signando el valor 0
uerido para tener la
ión no ha sido gira-
= 0. A cada función
ndición deseada. Si
› y el interruptor de
ue, $N = 0$, $P = 1$ y S
1; en conclusión, el
cima de la función
ejemplo, si $N = 1$,
n árbol de fallas se

$$A + A = A$$
$$A \cdot A = A$$
$$A + B = B + A$$
$$A \cdot B = B \cdot A$$
$$(A + B) + C = A + (B + C) = (A + B + C)$$
$$(A \cdot B) + C = A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B \cdot C)$$
$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$
$$A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C)$$
$$A + 1 = 1$$
$$A \cdot 1 = A$$
$$A + 0 = A$$
$$A \cdot 0 = 0$$
$$\overline{A} + A = 1$$
$$\overline{A} \cdot A = 0$$
$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$$
$$\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$
$$A \cdot B = \overline{A} + \overline{B}$$
$$A + B = \overline{A} \cdot \overline{B}$$
$$\overline{\overline{A}} = A$$

En el ejemplo anterior, se podría decir que, para hacer arrancar el automóvil, la transmisión debe encontrarse en punto neutral y no en el de estacionamiento o en punto de estacionamiento y no en neutral, y que el interruptor de arranque debe hacerse girar para arrancar:

$$SC = N \cdot \overline{P} \cdot S + \overline{N} \cdot P \cdot S$$
$$SC = S \cdot (\overline{P} \cdot N + \overline{N} \cdot P)$$

Es del conocimiento de todas las personas que la transmisión de un automóvil no puede estar en los puntos neutral y de estacionamiento al mismo tiempo. Otra forma de establecer esto es que cuando $P = 1$, $N = 0$, y cuando $N = 1$, $P = 0$, o $\overline{P} = N$, $\overline{N} = P$. Cuando esto se aplica a la ecuación, la cambia a $SC = S \cdot (N \cdot N + P \cdot P)$. Según la ley del álgebra booleana $A \cdot A = A$, la ecuación se reduce a $SC = S \cdot (N + P)$. Esta ecuación se reduce a la misma del ejemplo inicial aunque se piense que está definida de manera más completa. Cuando se agregan las otras condiciones posibles de la palanca a la ecuación inicial, es posible reducirla a $SC = S \cdot (N + P)$.

Supóngase que una bomba debe operar cuando se tenga un nivel por encima de un punto de referencia en el tanque A y por abajo de otro punto de referencia en un tanque B: entonces, P (bomba) $= A \cdot \overline{B}$. Esta bomba también necesita funcionar cuando el nivel en el tanque A se encuentre por encima de un punto de referencia fijado con anterioridad ($P = A \cdot C$). Cuando los niveles en los tanques B y C se encuentran por encima de los respectivos puntos fijos de referencia, se requiere operar la bomba ($P = B \cdot C$). La acumulación de los requisitos para la operación de la bomba, proporciona la ecuación $P = A \cdot \overline{B} + A \cdot C + B \cdot C$, que se reduce mediante el álgebra booleana a $P = A \cdot \overline{B} + B \cdot C$. Sin el empleo de las leyes, no parece posible que la función $A \cdot C$ pueda cancelarse en esta ecuación. El nivel en el tanque B debe encontrarse arriba o abajo de su punto de referencia ($B + \overline{B} = 1$). Si $B = 1$, entonces $A \cdot \overline{B} = 1$ tan pronto como $A = 1$. Si $B = 1$, entonces $B \cdot C = 1$ tan pronto como $C = 1$. $A \cdot \overline{B} + B \cdot C$ será igual a 1 antes o al mismo tiempo que la función $A \cdot C$ no cambia la ecuación. La aplicación directa de las leyes sin referencia al problema arroja los siguientes resultados.

$$\begin{aligned}
A \cdot \overline{B} + A \cdot C + B \cdot C &= A \cdot \overline{B} + A \cdot C \cdot (B + \overline{B}) + B \cdot C \\
&= A \cdot \overline{B} + A \cdot C \cdot B + A \cdot C \cdot \overline{B} + B \cdot C \\
&= A \cdot \overline{B} + A \cdot \overline{B} \cdot C + B \cdot C \cdot A + B \cdot C \\
&= A \cdot \overline{B} \cdot (1 + C) + B \cdot C\,(A + 1) \\
&= A \cdot \overline{B} + B \cdot C
\end{aligned}$$

¿Cuál es la razón por la que se pretende reducir una ecuación como $A \cdot \overline{B} + A \cdot C + B \cdot C$ a $A \cdot \overline{B} + B \cdot C$? Cada función + (OR) y (AND) en la ecuación final incrementa el costo del sistema de control en equipo y tiempo de programación. Al reducir la ecuación, se habrá reducido de cinco a tres el número de funciones AND y OR requeridas. Si se supone que las funciones AND y OR tienen el mismo costo, estos cambios representarán una reducción del 40% en el costo, sin alteración de las funciones del sistema.

Considérese otro ejemplo en el que se recibe una solicitud para la instalación de una alarma sencilla, que deberá sonar cuando el flujo en la tubería se encuentre en un valor por abajo del normal y la bomba sobrealimentadora en la tubería se encuentre funcionando. La alarma de referencia también sonará cuando la velocidad del flujo se encuentre por encima del valor normal. La velocidad normal del flujo se detectará mediante un interruptor de flujo que opera en un punto sencillo (sin espacio muerto). Si se le asigna la literal A al flujo por encima del normal y B a la bomba sobrealimentadora funcionando, la ecuación para la alarma será $AL = \overline{A} \cdot B + A$. Es posible emplear las leyes booleanas para mostrar que $\overline{A} \cdot B + A = A + B$. Esta simplificación demuestra que la situación inicial no es realista, lo que dará como resultado una señal de alarma cuando la bomba se encuentre en operación o el flujo se encuentre por encima del valor normal. Para que la alarma funcione con flujo bajo, como se pretende, el interruptor de flujo deberá tener dos puntos de ajuste, con un espacio muerto entre ellos. Si se asignan las literales A y B como se especificó líneas arriba y C al nuevo flujo por abajo del normal, la ecuación llegará a ser $AL = C \cdot B + A$, que funcionará como se pretende.

Control programable El sistema de control, una vez que las ecuaciones booleanas se han simplificado, puede diseñarse al utilizar cualquier número de sistemas de control binarios. Para el usuario, más fácil de instalar y modificar posteriormente a la instalación, es el controlador programable.

Un controlador programable es un sistema lógico que emite órdenes de salida cuando se encuentra una combinación predeterminada de condiciones de entrada. El equipo de computación (***hardware***) consiste en una forma especializada de computador que tiene una capacidad aritmética limitada y casi siempre se diseña para el trabajo más rudo en una planta industrial. En la figura 22-119 se muestra un controlador programable que consta de tres secciones: módulos de entrada, sección lógica de control (programable) y módulos de salida. Los módu-

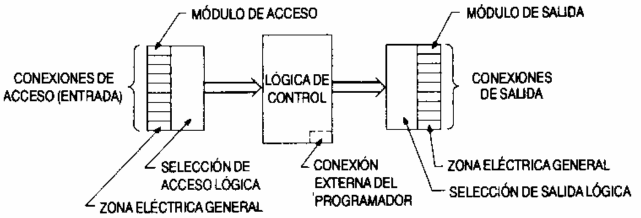


FIG. 22-119 Controlador programable.

los de entrada (*input*) convierten las señales de entrada en un nivel aceptable de voltaje para la sección lógica. La sección lógica registra la información proveniente de los módulos de entrada, compara esta información con los requisitos programados y emite órdenes a los módulos de salida (*output*) con base en esta comparación. Los módulos de salida convierten la señal de nivel lógico de la sección lógica hasta un nivel de energía compatible con la utilización del equipo. El voltaje hacia el módulo de entrada puede variar de 24 a 230 V de ca o cc, dependiendo del módulo de entrada que se emplee. El voltaje del nivel lógico se encontrará, de manera casi general, entre 5 y 15 V de cc. Por lo general, el voltaje de salida de los módulos de salida tendrá el mismo intervalo que el voltaje de entrada hacia los módulos de entrada.

El costo del equipo, mantenimiento y programación, junto con la frecuencia de cambios en el control, determinará cuándo debería utilizarse un controlador programable en lugar de un sistema de control no programable menos flexible. Casi por regla general, los controladores programables llegan a tener un costo mayor que los relevadores, cuando el número de éstos es mayor de 20. Sin embargo, el costo del programador externo, empleado para generar el programa de control, sólo puede incrementar este número en caso de que se incluyan pocos sistemas.

ELEMENTOS DE CONTROL FINAL

REFERENCIA GENERAL: Beard, *Final Control Elements*, Chilton, Filadelfia, 1969.

El elemento de control final es el mecanismo que altera el valor de la variable manipulada en respuesta a la señal de salida proveniende del controlador automático, la señal de salida que se obtiene de un dispositivo de control de manejo manual o por alguna manipulación manual directa. En instalaciones de control automático, éste consta normalmente de dos partes: **1**) un accionador o actuador que traduce la señal de salida del dispositivo controlador en una acción que comprende una gran fuerza o la manipulación de una energía de gran magnitud, y **2**) un dispositivo que responde a la fuerza del accionador y ajusta el valor de la variable manipulada. Por ejemplo, el actuador se puede utilizar para cambiar la posición de un tapón de válvula en un orificio, la velocidad de un dispositivo giratorio o la cantidad de energía que se suministra a una carga eléctrica.

En el control automático de procesos, el elemento de control final que se emplea con mayor frecuencia es la válvula de diafragma motor (DMV). Consta de un actuador neumático de diafragma motor y una válvula de control del fluido de proceso. En la figura 22-120 se ilustra un ejemplo usual de válvula de diafragma motor.

Cada dispositivo que se utiliza para constituir el elemento de control final posee sus propias características de retraso dinámico o constantes de tiempo. Esto quiere decir que los dispositivos no responderán de manera instantánea a los cambios de las señales de control o a las perturbaciones de la carga. La importancia del efecto de los retrasos depende del proceso en que se emplea el dispositivo. En algunos casos, estos retrasos pueden degradar gravemente el funcionamiento del sistema de control y, por tanto, provocar menguas en los buenos resultados del proceso. También pueden hacer que se requiera mayor atención e intervención del operador.

VÁLVULAS DE CONTROL

En cualquier estudio de las válvulas de control y sus características, se deben tomar en cuenta dos partes de la válvula en forma especial: primero, el cuerpo de la misma, sus aspectos geométricos y los materiales de construcción y, en segundo lugar, el macho o tapón de la válvula, su geometría y sus materiales de construcción. La geometría combinada del cuerpo y el macho determinan las propiedades de flujo de la válvula.

La mayor parte de las válvulas operan por medio de un actuador de posición lineal o alguna modificación de este tipo de actuador. Estos actuadores colocan el macho de la válvula en el orificio, en respuesta a una señal proveniente del controlador automático o a través de un ajuste mecánico manual.

Cuerpos de válvula Los cuerpos de las válvulas de control pueden ser roscados, bridados o también se pueden soldar en la línea de flujo; véase "Tuberías para plantas de proceso" en la sección 6. Los extremos roscados se filetean siempre con roscas hembra de tubería adelgazada estipuladas por la American Standard. Las dimensiones, los detalles de diseño y los valores nominales de temperatura y presión de los extremos bridados deben coincidir con las especificaciones del American National Standards Institute.

Los materiales más comunes para cuerpos son hierro colado y acero al carbono. Los aceros de baja aleación, como cromo-molibdeno, se emplean para altas temperaturas. Existen varios grados de aceros inoxidables, bronce, Monel, níquel, Inconel, Hastelloys y muchas aleaciones variables para servicios químicos corrosivos o para aplicaciones de temperaturas extremadamente bajas o altas. Cuando no es práctico utilizar cuerpos de válvulas colados, se pueden maquinar partiendo de una barra sólida o de material de forja, sobre todo en tamaños pequeños.

Los materiales de construcción para las partes vitales de la válvula de control, es decir, aquellas que deben someterse a tolerancias mínimas de maquinado para sellado, medición o movimiento, se deben seleccionar con extremo cuidado. En general, deben ser más resistentes a la corrosión, erosión, abrasión y distorsión que el material del cuerpo.

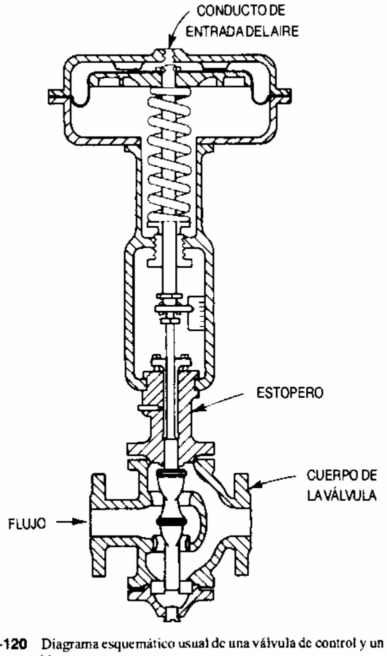


FIG. 22-120 Diagrama esquemático usual de una válvula de control y un accionador neumático.

En las figuras 22-1
diseño y construcció
aparecen en la figura
ción de las flechas, el
cerrarse. Cuando el
al cerrarse. Todas ella
méticamente (es deci
cio se diseñan en for
se les puede proporc
hermetismo.

Las válvulas que
22-122 no son del ti
nación con asientos
ción de la figura 22-
reduce los requisito
ciones son esencialn
válvulas de un solo
den invertir. La orie
también en relación

La válvula Saund
un revestimiento de
intervalo útil de tem
ma. La válvula de
utiliza para aplicac
miento de hule, per
Las válvulas esféric

Existen otras clas
vulas de control, p
de vástago y las de
cios y los asientos d
tener las caracterist
ne gran variedad de
control automático

Obturador de v
y el asiento de la v
determinar la velo
posición del vástag
ponibles que sirve
de las diversas cara

Características
racterísticas de vál
tante en la misma.
dez de cambio de
posición del vástag

Sensibilidad

Sensibilida

da tendrá el mismo
os de entrada.
ón, junto con la fre-
lo debería utilizarse
e control no progra-
ntroladores progra-
lores, cuando el nú-
to del programador
ol, sólo puede incre-
s sistemas.

ones del American

rro colado y acero al
-molibdeno, se em-
s de aceros inoxida-
achas aleaciones va-
ra aplicaciones de
no es práctico utili-
iar partiendo de una
años pequeños.
itales de la válvula
a tolerancias míni-
niento, se deben se-
ser más resistentes
material del cuerpo.

E
JRE

TOPERO

CUERPO DE
LA VÁLVULA

vula de control y un ac-

En las figuras 22-121 a la 22-123 se ilustran varios tipos comunes de diseño y construcción de válvulas de control. Cuando las válvulas que aparecen en la figura 22-121 funcionan con flujos que siguen la dirección de las flechas, el activador debe contrarrestar la fuerza del flujo al cerrarse. Cuando el flujo se invierte, estas válvulas tienden a golpear al cerrarse. Todas ellas son adaptables a prestar servicio cerrándose herméticamente (es decir, sin fugas) cuando el macho u obturador y el orificio se diseñan en forma adecuada para este tipo de aplicación. También se les puede proporcionar asientos de válvula suaves para obtener este hermetismo.

Las válvulas que tienen las configuraciones descritas en la figura 22-122 no son del tipo hermético, a menos que se empleen en combinación con asientos suaves o anillos en O para sellado. La configuración de la figura 22-122*a* tiene fuerzas equilibradas al cerrarse, lo cual reduce los requisitos de fuerza del actuador. Las otras dos configuraciones son esencialmente de fuerzas no equilibradas, ya que se trata de válvulas de un solo orificio. Las direcciones de flujo indicadas se pueden invertir. La orientación del macho de la válvula se puede invertir también en relación con la posición indicada en el diagrama.

La válvula Saunders, que aparece en la figura 22-123*a*, puede tener un revestimiento de plástico para lechadas y materiales corrosivos. Su intervalo útil de temperatura está limitado por el material del diafragma. La válvula de mariposa es económica en tamaños grandes y se utiliza para aplicaciones de cierre hermético utilizando un recubrimiento de hule, pero no es apropiada para grandes caídas de presión. Las válvulas esféricas o de bola tienen aplicaciones restringidas.

Existen otras clases de válvulas, pero no se suelen utilizar como válvulas de control, por ejemplo, las de compuerta, las de corredera, las de vástago y las de tapón. Para aplicaciones especializadas, los orificios y los asientos de estas válvulas tienen formas específicas para obtener las características de flujo en la válvula deseada. También se tiene gran variedad de activadores para estas válvulas, aplicables tanto al control automático como al funcionamiento manual.

Obturador de válvula La forma geométrica del obturador o macho y el asiento de la válvula es el factor individual más importante para determinar la velocidad de flujo en función de las características de posición del vástago. Existe gran variedad de tipos de obturadores disponibles que sirven para conferirle a la válvula de control cualquiera de las diversas características de flujo.

Características del flujo inherente Hay tres tipos básicos de características de válvula que se observan con una caída de presión constante en la misma. Esta clasificación se basa en la sensibilidad de rapidez de cambio de flujo que pasa por la válvula en relación con la posición del vástago de la misma.

$$\text{Sensibilidad decreciente } \left.\frac{dQ}{dL}\right|_{Q=0} > n > \left.\frac{dQ}{dL}\right|_{Q=\text{máx}}$$

$$\text{Sensibilidad lineal (constante) } \frac{dQ}{dL} = n$$

$$\text{Sensibilidad creciente } \left.\frac{dQ}{dL}\right|_{Q=0} < n < \left.\frac{dQ}{dL}\right|_{Q=\text{máx}}$$

En este caso, L es el porcentaje de desplazamiento o recorrido máximo del vástago de la válvula (ascenso de válvula): Q, el porcentaje del flujo máximo, y n, el coeficiente de flujo de la válvula. Estos tres tipos básicos de características aparecen ilustrados en los esquemas de la figura 22-124.

Como ejemplo del tipo de sensibilidad decreciente se pueden citar las válvulas de globo de abertura rápida, de vertedero y de vástago. Entre las de clase de sensibilidad creciente están las válvulas de igual porcentaje, las logarítmicas y las parabólicas. Las características de flujo inherente se determinan según la geometría del orificio y el obturador. Se acostumbra describir el gasto o velocidad de flujo que pasa por la válvula como una función de la posición del vástago manteniendo constante la caída de presión a través de la válvula. Los fabricantes de válvulas proporcionan esta información, que denominan datos de "coeficiente dimensional" (C_V, C_G o C_S), asociados por lo común con las condiciones estándares de una caída de presión constante de 6.9 kPa (1 lbf/in^2). En la figura 22-125 se muestran varias configuraciones usuales de obturadores o machos de válvulas de control. En la figura 22-126 se ilustran las características de flujo inherente comunes para estas configuraciones de obturador, con un asiento de válvula tradicional.

Las características de flujo inherente de una válvula se determinan tanto por la forma del asiento como por la del tapón u obturador. En la figura 22-127 se presenta el asiento normal con un tapón parabólico y un tapón de abertura rápida en un asiento de contorno. Además de generar un cambio importante en la característica de flujo, el asiento de contorno origina también fuerzas desequilibradas que se ejercen sobre el obturador para cambiar con menor rapidez conforme la válvula se abre o cierra que como sucede con un asiento normal. Esto conduce a una acción más suave del actuador y, por lo común, se obtienen mejores ubicaciones de dicho accionador cuando se tienen cambios pequeños en la salida del controlador, reduciendo o eliminando la necesidad de incluir dispositivos para compensar fuerzas en el diseño de la válvula.

Además de la sensibilidad de válvula antes descrita, hay otras dos propiedades importantes. La primera de ellas es el índice de intervalo o alcance R, que se define como sigue:

$$R = \frac{\text{flujo máximo controlable}}{\text{flujo mínimo controlable}}$$

y la segunda es el índice de rechazo T, que se define como sigue:

$$T = \frac{\text{Flujo máximo normal}}{\text{flujo mínimo controlable}}$$

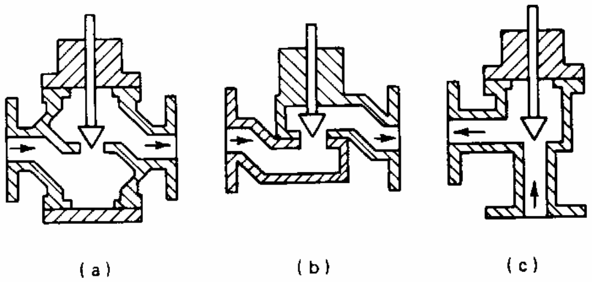


FIG. 22-121 Válvulas usuales de un solo orificio con diversos diseños de cuerpo. *a*) De globo. *b*) De cuerpo dividido. *c*) En ángulo.

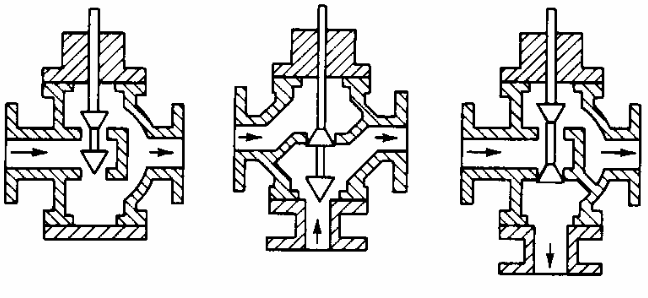


FIG. 22-122 Configuraciones usuales de válvulas de dos orificios para *a*) flujos directos, *b*) mezclado, *c*) separación de corriente.

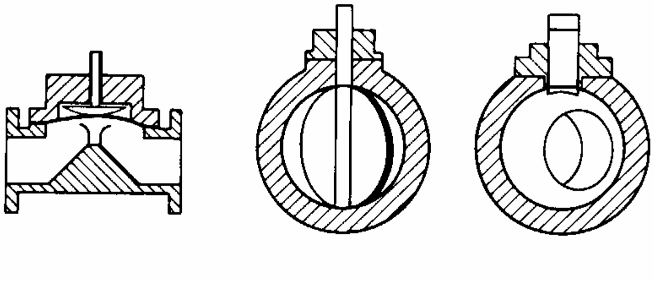


FIG. 22-123 Cuerpos de válvulas de control para fines especiales. *a*) Válvula Saunders de diafragma. *b*) Válvula de mariposa. *c*) Válvula de bola.

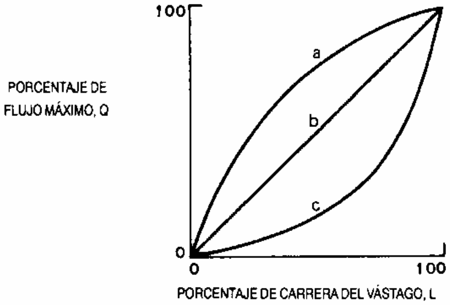


FIG. 22-124 Características del flujo inherente. *a*) Sensibilidad decreciente. *b*) Sensibilidad lineal o constante. *c*) Sensibilidad creciente.

En general, los tamaños de las válvulas se determinan de tal manera que $T = 0.7R$, en donde R se ubica, según el tipo de válvula de que se trate, entre 20 y 50.

La utilidad de los índices de intervalo y de rechazo se ilustrará por medio de una aplicación específica de válvula de control. Por ejemplo, si el diseño de un sistema de control de nivel de tanque requiere un cambio de 25 a 1 en la velocidad de flujo de entrada, a fin de mantener el nivel debido a una velocidad de flujo variable en la salida, entonces, el índice de rechazo de la válvula de control que se indica es, por lo menos, de 25 y el índice de intervalo, por lo menos, de 35. Como es lógico suponer, las válvulas de tipo de sensibilidad creciente tienen razones de intervalo más elevadas.

La caída de presión a través de una válvula instalada rara vez es constante conforme se ajusta la posición del vástago. Como resultado de ello, las características de flujo inherente no son suficientes para determinar la velocidad de flujo instalado para cualquier posición de vástago en particular.

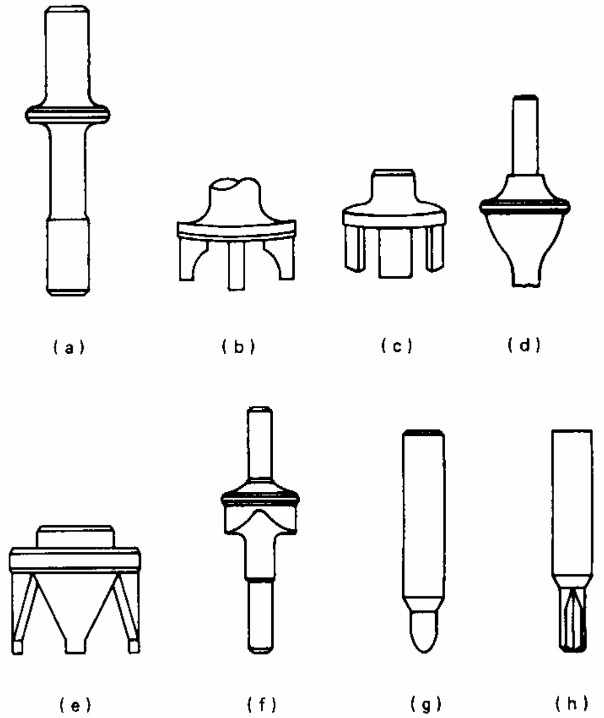


FIG. 22-125 Formas usuales de tapones u obturadores de válvulas. *a*) Abertura rápida de un solo orificio dirigido para la parte superior e inferior. *b*) Abertura rápida de orificio dirigido. *c*) Orificio rectangular (lineal). *d*) Tapón de estrangulamiento (lineal modificado). *e*) Orificio en V (lineal modificado). *f*) Orificio en V de igual porcentaje. *g*) Tapón de estrangulamiento miniatura (de igual porcentaje). *h*) Tapón estriado miniatura (de igual porcentaje).

ıos, de 35. Como es
lad creciente tienen

ıstalada rara vez es
ıgo. Como resultado
son suficientes para
ıalquier posición de

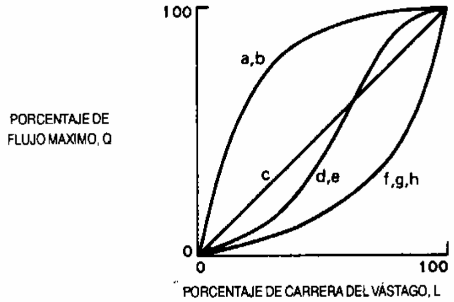


FIG. 22-126 Generalización de las características del flujo inherente para los tapones de válvula ilustrados en la figura 22-125.

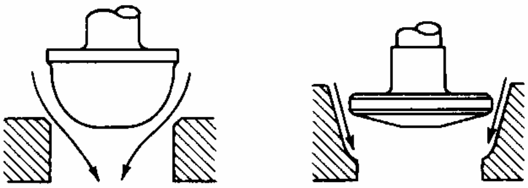


FIG. 22-127 Asientos de válvula normal y de contorno, con tapones parabólicos y de abertura rápida.

Características del flujo instalado Cuando las válvulas de control se combinan con otros equipos para el manejo de fluidos en sistemas de procesos, las características compuestas de velocidad y flujo difieren de las de cualquier componente individual del sistema. Los gastos o velocidades de flujo que pasan por la válvula ya no se determinan basándose exclusivamente en la geometría del cuerpo de la válvula y el obturador.

Los efectos de las resistencias generadas por las tuberías, los orificios o cualquier otro equipo en serie con la válvula de control y la variación de carga disponible con la velocidad de flujo afectan la relación flujo-posición de vástago. En el caso de una válvula lineal, este efecto se describe por medio de la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{L}{[\alpha + (1 - \alpha)L^2]^{1/2}} \qquad (22\text{-}31)$$

en donde Q y L son las fracciones del flujo máximo y el recorrido máximo del vástago, respectivamente; el término se define como sigue:

$$\alpha = \frac{\text{diferencial de carga de la válvula a flujo máximo}}{\text{diferencial de carga de la válvula a flujo cero}}$$

Las características de flujo instalado para una válvula de control lineal instalada en sistemas de flujo que tienen diferentes valores de α son tal como se indican en la figura 22-128. Los valores decrecientes de α, indican restricciones de flujo crecientes que son externas a la válvula. Para α igual que 1, la característica de flujo instalado es idéntica a la característica del flujo inherente.

Las características de flujo instalado de una válvula de tipo de sensibilidad creciente (parabólica o de igual porcentaje) con resistencia en serie en el sistema de flujo, se describen por medio de la ecuación

$$Q = \frac{L^2}{[\alpha + (1 - \alpha)L^4]^{1/2}} \qquad (22\text{-}32)$$

y se ilustran también en la figura 22-128

Selección de la válvula

Selección del tipo de válvula Uno de los objetivos del diseño de los sistemas de control es obtener una relación de ganancia específica entre el controlador y alguna variable de salida del proceso. Por lo común, esta relación es de tipo lineal; dicho de otra manera, utilizando el diagrama de bloques generalizado (Fig. 22-129) y la nomenclatura de

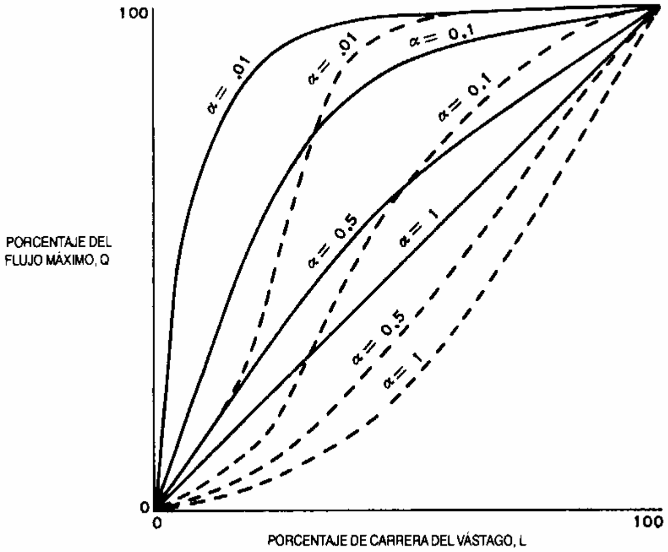


FIG. 22-128 Características generalizadas de flujo instalado correspondientes a válvulas de control lineal (curvas continuas) y parabólico (curvas de trazo interrumpido o discontinuo), conforme α varía con la carga constante disponible aplicada a la porción del proceso que influye en las características preestablecidas.

la función de tran
pendiente de $M(s)$
ma de bloques, M
válvula, y $A(s)$ el
instantánea del v
Esto requiere una
o por lo menos, q
ganancia del proc
valo normal de op
las características
características de
se caracterice po
En cualquier ca
debe estar regulad
bales deseadas. P
de $A(s)$ o $C(s)$, por
requerir, por ejem
Las válvulas
cuando más del
válvula de contr
cuando las presi
tables, cuando la
actuador domina
y las ganancias
cuando las may
carga, o cuando
y la variable med
Algunas cond
terística inheren
control que se p
(*on-off*), la rápid
cuando la consta
que la constante
velocidades de c
Se indica el c
sensibilidad cre
aberturas de vál
cuando se deben
vula, cuando la
de la caída del s
respuesta a los
lineal en un pro
Las caracterís
ejemplifican po
indicadas cuand
válvula y no se
Hay otros fac
los cuales se inc
dido en la corrie
cerrar la válvula
proceso que se e
total aplicada a
las propiedades
Determinaci
cionar las carac

lvula de control lineal
es valores de α son tal
s decrecientes de α,
externas a la válvula.
alado es idéntica a la

álvula de tipo de sen-
ntaje) con resistencia
nedio de la ecuación

(22-32)

tivos del diseño de los
inancia específica en-
el proceso. Por lo co-
manera, utilizando el
y la nomenclatura de

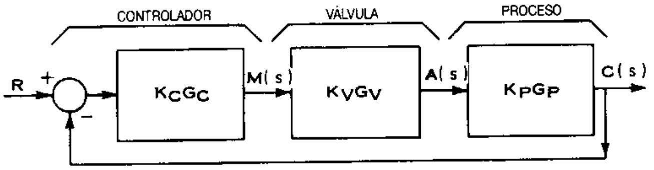


FIG. 22-129 Diagrama de bloques generalizado, en donde $M(s)$ es la posición del vástago de la válvula y $A(s)$ el flujo del fluido de proceso producido por la ubicación instantánea del vástago, como se ilustra en la figura 22-28.

la función de transferencia, el producto $K_vK_pK_c$ es constante e independiente de $M(s)$, $A(s)$ y $C(s)$, y K_c es también constante. En el diagrama de bloques, $M(s)$ es la señal de posicionamiento del vástago de la válvula, y $A(s)$ el flujo del fluido de proceso que resulta de la ubicación instantánea del vástago de la válvula. (Véase también la Fig. 22-28). Esto requiere una válvula que posea una característica instalada lineal, o por lo menos, que sea lineal en el intervalo normal de operación, si la ganancia del proceso K_p es constante. Si K_p no es constante en el intervalo normal de operación, K_v es proporcional a $1/K_p$. En otras palabras, las características de ganancia de la válvula deben ser la inversa de las características de ganancia del proceso, si se desea que la combinación se caracterice por una ganancia constante.

En cualquier caso, la característica instalada de una válvula de control debe estar regulada por la naturaleza del proceso y las características globales deseadas. Por ejemplo, se puede buscar que K_vK_p sea una función de $A(s)$ o $C(s)$, por ejemplo, $K_vK_p = f(C)$. En este caso, $K_v = f(C)/K_p$ puede requerir, por ejemplo, una válvula de sensibilidad creciente.

Las válvulas de característica lineal inherente son las indicadas cuando más del 40% de la caída de presión en el sistema ocurre en la válvula de control, cuando no se requiere un alto índice de intervalo, cuando las presiones de alimentación y descarga de la válvula son estables, cuando las constantes de tiempo combinadas de la válvula y el actuador dominan el circuito de control, cuando este último es estable y las ganancias proporcionales del controlador son mayores que 10, cuando las mayores perturbaciones del proceso son los cambios de carga, o cuando se tiene una relación lineal entre la variable controlada y la variable medida.

Algunas condiciones que indican la elección de válvulas de característica inherente de sensibilidad decreciente (abertura rápida) son: control que se puede ejercer con una acción de encendido-apagado (*on-off*), la rápida disponibilidad de una máxima capacidad de válvula, cuando la constante de tiempo del proceso es pequeña pero no menor que la constante de tiempo de la válvula y no se requieren pequeñas velocidades de cambio en el flujo con el desplazamiento del vástago.

Se indica el empleo de una válvula de característica inherente de sensibilidad creciente cuando se busca un buen control a pequeñas aberturas de válvula, cuando se requiere un alto índice de intervalo, cuando se deben abastecer caídas de presión con la abertura de la válvula, cuando la caída de presión en la válvula es una porción pequeña de la caída del sistema con grandes aberturas de válvula, y cuando la respuesta a los cambios de la salida del controlador es de índole no lineal en un proceso de sensibilidad decreciente.

Las características inherentes de válvula lineal modificada, que se ejemplifican por medio de la curva *d*, *e* de la figura 22-126, son las indicadas cuando se desea un buen control a pequeñas aberturas de válvula y no se requiere un alto índice de intervalo.

Hay otros factores que afectan la selección del tipo de válvula, entre los cuales se incluyen: la cantidad y la naturaleza del material suspendido en la corriente de proceso, el grado de hermetismo que se desea al cerrar la válvula, el equilibrio conveniente de las fuerzas del fluido de proceso que se ejercen en el obturador de la válvula, la caída de presión total aplicada a la válvula, la presión de vapor del fluido de proceso y las propiedades corrosivas del fluido de procesamiento.

Determinación de las dimensiones de la válvula Además de seleccionar las características apropiadas de la válvula y el obturador, macho o tapón, que sean semejantes a las del proceso, es importante que las dimensiones de la válvula de control sean las adecuadas. Por ejemplo, no se acostumbra usualmente utilizar una válvula de 2 in en una línea o tubería de 2 in.

La válvula de control desempeña su función de regular la velocidad de la carga tratada en virtud de ser una resistencia ajustable al flujo, creando una caída de presión desde la entrada de la válvula hasta su salida. El grado de control del flujo de proceso se determina mediante la fracción de la caída de presión total del proceso que ocurre en la válvula misma. Si ésta es demasiado grande, la sensibilidad es reducida y el índice de intervalo demasiado alto, de manera que esa válvula se emplea sólo en la posición casi cerrada, desempeñando una acción de control deficiente. Por otro lado, si la válvula es demasiado pequeña, la sensibilidad es mayor pero el intervalo en que funciona es limitado, de modo que opera normalmente cerca de la abertura máxima, lo cual restringe su capacidad de control.

Los fabricantes de válvulas han sugerido fórmulas y procedimientos para ayudar a seleccionar el tamaño de válvula adecuado. Sin embargo, estos elementos deben utilizarse con cautela. Estos procedimientos de selección se basan en modificaciones de la ecuación de flujo $Q = K\sqrt{\Delta P}$, donde Q = gasto o velocidad de flujo, ΔP = caída de presión en la válvula o el orificio, y K es una constante asociada con el coeficiente de válvula C_r. C_r incluye el tamaño y la forma de apertura de la válvula. Las diversas modificaciones toman en cuenta las propiedades del fluido que se está controlando y la geometría de la válvula del fabricante específico.

ACCIONADORES DE POSICIÓN LINEAL

Según la definición establecida para el elemento de control final, el accionador o actuador es un transductor. Este dispositivo se encarga de transducir la señal de control de una forma o nivel de energía o potencia a otra, por ejemplo, de una señal neumática a una acción mecánica que se utiliza para regular una variable de proceso. En casi todos los casos, el accionador de válvula se puede clasificar como accionador de posición lineal. Suministra una posición de salida que es proporcional a su señal de entrada. El movimiento del elemento de salida del accionador es, casi siempre, de traslación (en oposición a rotacional), aunque el movimiento de traslación se puede transformar en rotatorio para operar algunas válvulas.

Accionadores neumáticos De todos los accionadores de control de procesos, el de tipo neumático es el de empleo más común. Hay varias configuraciones de *hardware* en el mercado, que sirven para gran variedad de aplicaciones, y cada una de ellas ofrece sus propias ventajas. El accionador neumático que se ilustra en la figura 22-120 es un dispositivo de resorte en el cual la presión controlada del aire de entrada ejerce sobre el diafragma la fuerza suficiente para compensar o contrarrestar una porción de la fuerza del resorte.

Cuando se registra un aumento en la presión controlada del aire, se genera un movimiento del tapón u obturador de la válvula en dirección descendente, ocasionando una reducción del flujo que pasa por la válvula. Esta acción se denomina "cierre por aire" (véase la Fig. 22-130*a*). Si la abertura de entrada de aire del actuador queda abajo del diafragma, la acción del actuador es de "apertura por aire" (véase la Fig. 22-130*b*).

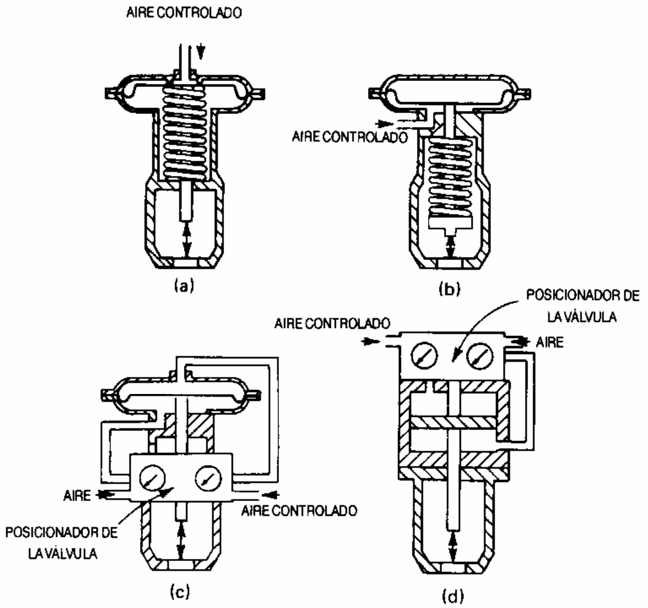


FIG. 22-130 Accionadores neumáticos lineales.

TABLA 22-9 Propiedades de accionadores neumáticos usuales de las clases ilustradas en la figura 22-130

Diagrama esquemático	Tipo de construcción	Posicionador usado	Potencia hp	Carrera in	Empuje, lb	Limitaciones de diseño	Ventajas y aplicaciones más comunes
a	Resorte y diafragma; el aire mueve al vástago hacia abajo	No	0.05	Hasta 3	Hasta 800	El empuje es limitado. El resorte absorbe el empuje	Sencillo y seguro. Falla en sentido ascendente al perder aire. Muy utilizado en el control de procesos
b	Resorte y diafragma; el aire mueve el vástago hacia arriba	No	0.05	Hasta 3	Hasta 800	Como *a*	Falla en sentido descendente al perder aire, en cualquier otro caso, como *a*
a o *b*	Resorte y diafragma	Sí	0.15	Hasta 3	Hasta 800	Como *a* o *b*	Como *a* o *b* con una dinámica de control mejorada
c	Diafragma de presión equilibrada o sin resorte	Necesario	0.15	Hasta 3	Hasta 2000	Puede no ofrecer seguridad	Posee mayor empuje que los de tipo de resorte
d	Pistón de presión equilibrada	Necesario	1.0	Hasta 36	Hasta 5000	Puede no ofrecer seguridad	Utiliza aire a alta presión. Tiene muchas aplicaciones en los procesos químicos

El accionador de resorte es capaz de proporcionar el suficiente empuje para muchas aplicaciones de la válvula de control. Sin embargo, la fricción del vástago de la válvula o las fuerzas generadas por el fluido de proceso que atraviesa la válvula pueden evitar que el accionador adopte una posición proporcional a la entrada de presión de aire controlada. En aplicaciones de suma importancia, se puede utilizar un posicionador de válvula para contrarrestar esta dificultad (véase la Fig. 22-130*c* y *d*). En esencia, el posicionador es un controlador de alta ganancia y retroalimentación de posición, que se conecta al vástago de la válvula. Su punto de referencia se controla por medio de presión de aire proveniente del controlador de proceso. Véase el análisis de la figura 22-135 bajo el título "Posicionadores y reforzadores (*Boosters*)."

En la tabla 22-9 se presenta un resumen de algunas de las características de los actuadores neumáticos más comunes.

Accionadores electroneumáticos Se ha incrementado notablemente la instalación de controladores de proceso de tipo electrónico, que casi siempre proporcionan señales eléctricas de corriente continua (cc) para impulsar el sistema del actuador y se utiliza en forma continua el accionador de diafragma de resorte de tipo neumático que tiene un uso muy difundido, lo cual ha dado origen a una gran cantidad de entrecaras o conexiones entre los equipos electrónicos y neumáticos. En la figura 22-97 se muestra un transductor de presión a corriente.

En la figura 22-131 se ilustra el principio general de un accionador electroneumático. En esencia, se trata de una combinación de transductor de corriente a presión, un posicionador de retroalimentación y un actuador neumático de resorte y diafragma. Si un motor escalonado activa la boquilla de agitación o chapaleta de la boquilla, el accionador

30

aplicaciones
omunes

ˈalla en sentido
rder aire.
ı el control

ccndente al perder
r otro caso, como *a*

ı dinámica de
ı

je que los de tipo

resión.
dicaciones en
nicos

mentado notable-
de tipo electróni-
ricas de corriente
dor y se utiliza en
sorte de tipo neu-
dado origen a una
s equipos electró-
un transductor de

l de un accionador
binación de trans-
troalimentación y
motor escalonado
tilla, el accionador

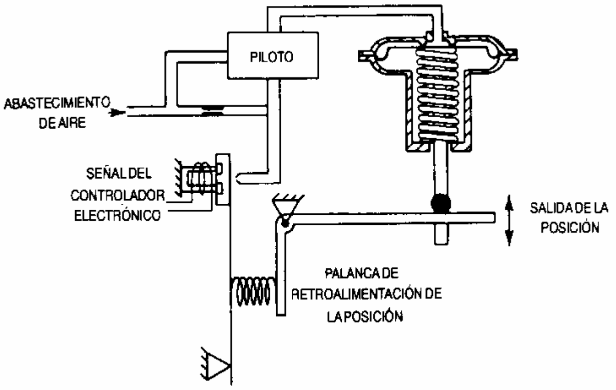


FIG. 22-131 Accionador electroneumático usual.

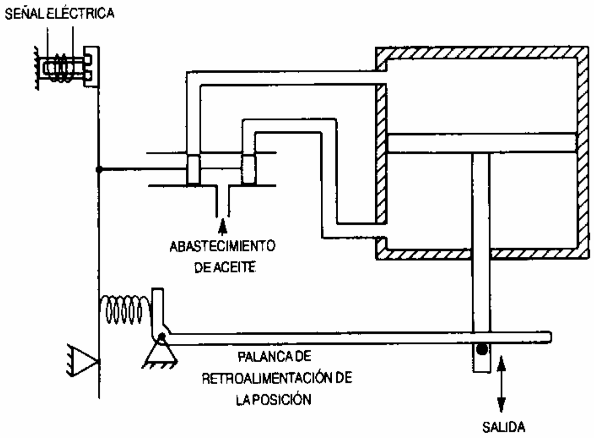


FIG. 22-132 Accionador electrohidráulico.

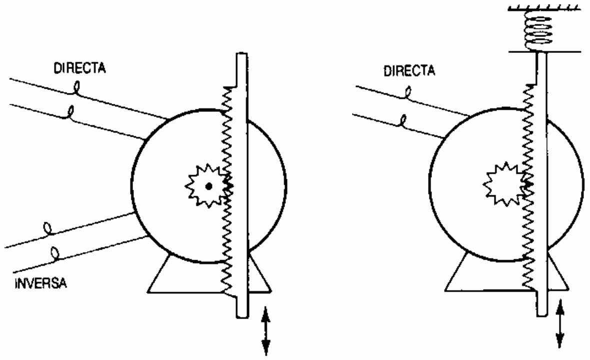


FIG. 22-133 Accionadores de motor eléctrico.

electroneumático manejará las señales pulsátiles provenientes del controlador de computadora digital.

Accionadores hidráulicos Por lo común, los accionadores hidráulicos tienen la forma de un pistón hidráulico. Éste se puede impulsar aplicando fluido hidráulico presurizado a cualquier lado del pistón (doble acción) o a uno solo, con un resorte de oposición que proporciona el movimiento en dirección contraria. Estas diversas configuraciones son análogas a los actuadores neumáticos que se ilustran en la figura 22-130.

Actuador electrohidráulico El actuador electrohidráulico usual consiste en un transductor eléctrico a hidráulico, un posicionador de retroalimentación y un accionador de pistón hidráulico. El funcionamiento del actuador de pistón hidráulico es básicamente el mismo que el del pistón neumático, y ambos requieren algún medio de retroalimentación de posición del pistón. Un transductor típico eléctrico a hidráulico consta de un mecanismo de bobina e imán y un carrete de piloto hidráulico. En la figura 22-132 se ilustra un accionador de pistón electrohidráulico que emplea este tipo de transductor.

Accionadores eléctricos Hay dos clases básicas de actuadores eléctricos para aplicaciones de posición lineal, y son el motor eléctrico y el solenoide eléctrico. Ambos tipos se utilizan con facilidad para accionadores de dos posiciones. El motor puede estar provisto de un devanado directo y uno inverso, para lograr la operación de dos posiciones. El devanado inverso se elimina cuando se proporciona algún medio de retorno de resorte. En la figura 22-133 se presentan esquemas de las dos configuraciones de motor.

Existen muchas maneras de convertir la rotación de motor en acción lineal. Por ejemplo, a veces se utiliza un tren de engranajes o una bomba hidráulica reversible y un motor o cilindro hidráulico. La velocidad con que se mueve el accionador de una posición a la otra se determina básicamente por medio de la potencia de la transmisión del motor eléctrico.

La adición de equipo de retroalimentación de posición y equipo sensor y de conmutación de la señal apropiada, permite que el accionador se pueda poner en marcha o detener en posiciones intermedias. En este caso, el accionador se convierte en el equivalente de un accionador electroneumático o electrohidráulico.

El solenoide eléctrico es un dispositivo de dos posiciones: cuando la corriente eléctrica se aplica a la bobina, la armadura del solenoide se mueve a la posición extrema energizada, y cuando se suprime la corriente, dicha armadura retorna a la posición desenergizada por medio de un resorte. Es factible obtener un aumento en la capacidad de empuje conectando una válvula de piloto neumática o hidráulica, o bien, un conmutador de motor eléctrico o la armadura del solenoide.

Accionadores mecánicos Los accionadores manuales de diversos tipos son ejemplos comunes de este tipo de dispositivos mecánicos. La configuración real del equipo puede ser muy variada: desde la rueda montada en la parte superior o lateral de un actuador de resorte y diafragma, hasta la configuración mecánica de palanca y eslabón que se opera manualmente.

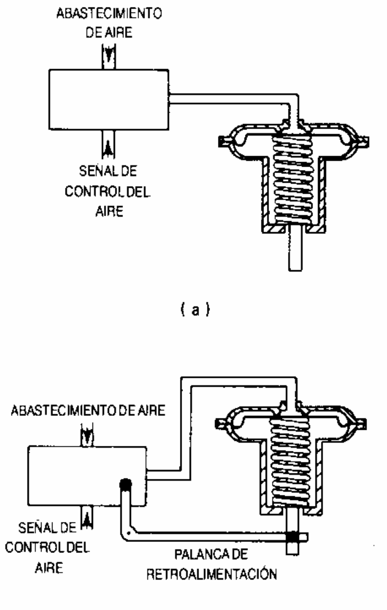


FIG. 22-134 Configuraciones del reforzador neumático y posicionador (*Booster*).

POSICIONADORES Y REFORZADORES (BOOSTERS)

Los posicionadores se mencionaron en relación con algunos accionadores de posición lineal y los controladores hidráulicos automáticos.

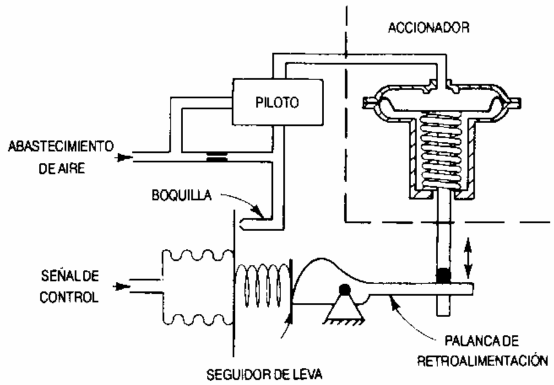
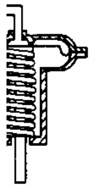
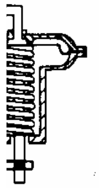


FIG. 22-135 Representación esquemática de un posicionador neumático con leva característica.

Hay otro disposit
miento de ciertos
dor o relevador p
forzadores neum
Principios de
mático-mecánic
(de 10 a 100). El
y potencia neum
de las configura
reforzador *a*). La
sarse en las nece
hay un piloto qu
serva en la figura
mal de presión d
sión adicional
emplea un refor
nador, con aire a
ser similar al que
El funcionami
señal de posición
la salida del posi
rencia entre esta
esquema en la fi
señal de control
la presión ejercid
de aire por el pilo
también el texto
subsección "Tra
obligado a desce
crementar la fue
del accionador se
y la leva es igual
El empleo de
una característi
leva, la relación
de "caracterizar
en la figura 22-
vástago y la ab





ɔo y posicionador

dor de resorte y dia-
ɔca y eslabón que se

BOOSTERS)

on algunos acciona-
iulicos automáticos.

Hay otro dispositivo auxiliar que se emplea para mejorar el funcionamiento de ciertos tipos de elementos de control final, que es el reforzador o relevador piloto. Aquí sólo se verán los posicionadores y los reforzadores neumáticos.

Principios de operación El posicionador es un amplificador neumático-mecánico de retroalimentación, que tiene una alta ganancia (de 10 a 100). El reforzador es un amplificador de alimentación directa y potencia neumática. En la figura 22-134 se muestran los esquemas de las configuraciones normales para utilizar el posicionador *b*) y el reforzador *a*). La configuración específica que se seleccione debe basarse en las necesidades de la aplicación de que se trate. Normalmente, hay un piloto que forma parte integral del posicionador, como se observa en la figura 22-135. Este opera por lo común en el intervalo normal de presión de 20.7 a 103.4 kPa (3 a 15 lbf/in^2). Si se requiere presión adicional para hacer funcionar el accionador de válvula, se emplea un reforzador que generalmente no se integra con el posicionador, con aire a mayor presión. El reforzador o relevador piloto puede ser similar al que se ilustra en la figura 22-94.

El funcionamiento del posicionador usual consiste en comparar una señal de posición mecánica con una señal neumática de control, y ajustar la salida del posicionador de tal manera que se reduzca cualquier diferencia entre estas dos señales. Esta operación se ilustra por medio de un esquema en la figura 22-135. Un incremento en la presión del aire de la señal de control expande los fuelles de entrada, incrementando con ello la presión ejercida en la boquilla. Esto permite que se tenga un mayor flujo de aire por el piloto hasta el accionador de diafragma y resorte. Consúltese también el texto relacionado con las figuras 22-94 y 22-95 dentro de la subsección "Transductores de la medición al indicador." El vástago se ve obligado a descender, moviendo así la leva de retroalimentación para incrementar la fuerza ejercida en el resorte de retroalimentación. La leva del accionador se ubica en forma correcta cuando la fuerza entre el resorte y la leva es igual que la fuerza del fuelle.

El empleo de la leva de retroalimentación confiere al posicionador una característica útil. Si se selecciona debidamente el contorno de la leva, la relación entre la señal de control y la posición de salida se puede "caracterizar o tipificar". El resultado se indica esquemáticamente en la figura 22-124, si el flujo se sustituye por medio de la carrera del vástago y la abscisa mediante la señal de control. Hasta cierto grado restringido, el contorno de la leva del posicionador se puede seleccionar para contrarrestar o para reforzar las no linealidades de válvula o del proceso, tal como se desee. En general, las levas se cambian fácilmente para obtener características diversas.

Dinámica de los posicionadores y reforzadores Las propiedades dinámicas del posicionador y el reforzador neumáticos dependen de las características del equipo que se impulse por medio de estos dispositivos. Por ejemplo, el posicionador mueve casi siempre un reforzador que impulsa un actuador de diafragma, o bien, moverá directamente el actuador. El área del diafragma del accionador, y la longitud y el diámetro de los tubos que están entre el posicionador, el reforzador y el actuador, ejercen cierta influencia en las propiedades dinámicas del posicionador y el reforzador. La información sobre la respuesta de frecuencia de una combinación usual de posicionador-accionador, ilustrada en la figura 22-136, muestra el efecto del volumen creciente del accionador, por aumento tanto del área como de la carrera del diafragma. En general, al incrementarse el área del diafragma, aumenta la longitud del recorrido de la válvula y al aumentar la longitud o reducir el diámetro de los tubos de interconexión se tiene el mismo efecto cualitativo, es decir, se reduce el paso de banda de frecuencias de la combinación. Las diversas combinaciones de controlador, posicionador, reforzador y accionador para aumentar el paso de banda de frecuencias son: controlador-actuador, controlador-posicionador-accionador, controlador-reforzador-accionador y controlador-posicionador-reforzador-accionador.

Se debe observar que la combinación controlador-posicionador o controlador-reforzador tienen un efecto notable en la constante de tiempo del circuito de control.

Lineamientos de las aplicaciones La selección correcta de un posicionador y/o reforzador se debe basar en el principio de igualación o comparación de la dinámica del proceso. Es preciso tomar en cuenta factores como el desequilibrio de la presión de válvula, la fricción del collarín de empaque y la fricción del vástago de la válvula. Los objetivos del control para una instalación específica se deben incluir también en dicha selección. Debido a la diversa naturaleza de los muchos factores presentes, no es posible especificar ninguna regla absoluta para hacer la elección adecuada.

Se han propuesto varios lineamientos de aplicaciones para lograr una elección apropiada. Esta especie de guía se basa en los objetivos

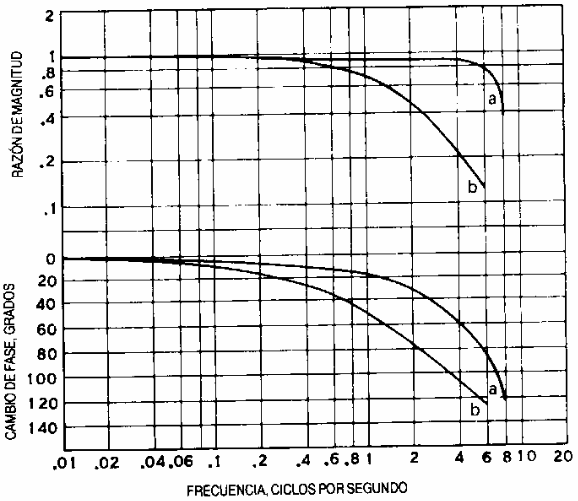


FIG. 22-136 Curvas de respuesta de frecuencia de un sistema usual de posicionador neumático con accionador de diafragma. *a*) Diafragma del accionador, 50 in^2 y carrera del vástago de válvula de $^3/_4$ in. *b*) Diafragma del accionador, 170 in^2 y carrera del vástago de válvula de 2 in.

para los cuales se destinarán los equipos de control. Las siguientes condiciones sugieren que se tome en cuenta el empleo de un posicionador y/o un reforzador.

1. Cuando se requiere un ordenamiento separado para controlar dos o más válvulas en forma secuencial, en porciones correspondientes de la salida del controlador de 20.7- a 103.4- kPa (3 a 15 lbf/in^2) de presión manométrica.

2. Cuando la señal de salida del controlador se debe amplificar para suministrarle al accionador un empuje adicional con el fin de contrarrestar la fricción, obtener una colocación exacta de la válvula o contrarrestar las fuerzas de válvula no equilibradas.

3. Cuando se debe mejorar la respuesta transitoria, con objeto de recuperarse de alteraciones como respuesta a cambios lentos y pequeños de la salida del controlador, o cuando las líneas de transmisión neumática que provienen del controlador son largas.

4. Cuando se necesita un cambio en la característica de flujo de válvula sin alterar la construcción de la misma.

5. Cuando se requiere la colocación de un accionador de diafragma o de cilindro sin resorte.

Una vez que se toma la decisión de utilizar uno de estos dispositivos auxiliares, las características dinámicas del proceso constituyen la clave para seleccionar el aparato apropiado. En general, los posicionadores se recomiendan para procesos relativamente "lentos", como los procesos de nivel, térmicos y mezclado. Los reforzadores se sugieren para procesos "rápidos"; por ejemplo, procesos de flujo, presión de líquido y presión de gas. También puede ser conveniente incluir un reforzador en el circuito del posicionador, si se tiene un accionador de gran tamaño.

VÁLVULAS PARA ALIMENTACIÓN DE SÓLIDOS

Los accionadores de posición lineal y las válvulas de control que se describieron con anterioridad, se emplean primordialmente para el control de flujo de fluidos (líquidos o gases). Hay otras clases de equipos que se necesitan para manejar la transferencia de materiales sólidos. El equipo con válvula de medición de sólidos en particular depende del volumen, la densidad, la forma específica y el tamaño de los sólidos que se van a manejar.

El gasto de este tipo de válvulas se ajusta conectándolas a motores de velocidad variable. Esto hace que sean equivalentes a las configuraciones de válvula y accionador, donde el controlador de velocidad es el equivalente de un reforzador o un posicionador.

OTROS ELEMENTOS DE CONTROL FINAL

Unidades motrices de velocidad variable El motor de velocidad variable es una unidad motriz de velocidad variable de empleo común. Este tipo de dispositivo puede ser un motor eléctrico universal con una fuente de voltaje ajustable o un motor eléctrico de ca que se alimenta por medio de una fuente de frecuencia ajustable. Para aplicaciones especiales, el motor de velocidad variable puede ser de tipo de turbina de gas o aire en donde la presión de la fuente se hace variar para cambiar la velocidad.

Entre otras unidades motrices de velocidad variable se incluyen las unidades de banda de relación variable, las unidades de cono de razón variable y la bomba hidráulica de desplazamiento variable que mueve un motor hidráulico. Todos estos dispositivos se impulsan por medio de un motor de velocidad constante, que casi siempre es eléctrico.

Accionadores de energía eléctrica variable Hay una variedad de dispositivos con que puede ajustarse la energía eléctrica. En la figura 22-137 se ilustran varios de los métodos más comunes, como los que se aplican a elementos de calentamiento.

Bombas de salida variable También existen varias clases de bombas de salida variable. Las más comunes son las de volumen constante, que funcionan por medio de unidades motrices de velocidad variable o bombas de volumen variable impulsadas con motores de velocidad constante. Las bombas de volumen variable se ajustan, casi siempre, cambiando la longitud de carrera del pistón. El pistón puede bombear el fluido de proceso utilizando directamente válvulas múltiples de retención para asegurar velocidades de bombeo reproducibles. El pistón puede introducirse también en una cámara hidráulica sellada, que activa el diafragma de una bomba de diafragma.

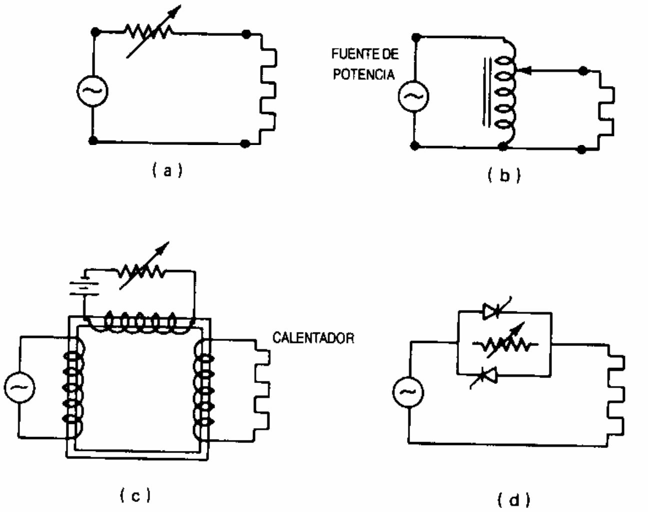


FIG. 22-137 Dispositivos de control de energía eléctrica. *a*) Resistencia en serie. *b*) Autotransformador variable. *c*) Reactor saturable. *d*) Rectificadores controlados de silicio.

' el tamaño de los

índolas a motores
ates a las configu-
lor de velocidad es

iotor de velocidad
de empleo común.
universal con una
a que se alimenta
a aplicaciones es-
tipo de turbina de
ariar para cambiar

ble se incluyen las
s de cono de razón
ariable que mueve
pulsan por medio
te es eléctrico.
ay una variedad de
trica. En la figura
nes, como los que

ias clases de bom-
olumen constante,
velocidad variable
tores de velocidad
stan, casi siempre,
ón puede bombear
as múltiples de re-
ducibles. El pistón
ca sellada, que ac-

TELEMETRÍA Y TRANSMISIÓN

Por lo general, se considera que la telemetría es la transmisión de una señal de medición a través de cierta distancia. En general, el sistema de telemetría consta de cinco componentes: un dispositivo de medición, un transmisor que convierte la señal de medición en una señal apropiada para transmitirla y que presenta esta señal al medio de transmisión, una trayectoria de transmisión, un dispositivo receptor que traduce la señal transmitida en una señal que sea aceptable para el dispositivo final, y el dispositivo final o presentador.

En general, los enlaces de telemetría de radio, microondas y video se emplean sólo en los niveles de jerarquía superior del control de procesos, es decir, fuera de línea, por lo que no se analizarán aquí. No obstante, se utilizan en línea en campos como control de tuberías, trabajos científicos y sistemas de negocios.

Casi todos los sistemas de telemetría asociados con sistemas de control de proceso son de un tipo de ubicación fija a ubicación. Casi todos ellos utilizan conductores fijos eléctricos o neumáticos como medio de transmisión. La distancia de transmisión varía de varios metros hasta algunos kilómetros.

Los termopares constituyen la clase más amplia de dispositivos de medición de proceso, cuya salida se transmite a una distancia determinada entre el punto de medición y el de utilización. En su mayor parte se trata de señales de cc a nivel milivolt, que se transmiten sin transformarse por medio de alambres o conductores de extensión hasta el punto de empleo. No obstante, con la utilización cada vez mayor de la electrónica de estado sólido y circuitos integrados, estas mediciones se están transformando y transmitiendo en otras formas.

Este estudio se ocupará de aspectos como la transmisión de señales de control a un actuador de válvula remoto, la transmisión de una señal de medición a un receptor remoto y la transferencia de información entre computadoras. En otras partes de esta sección se estudian los equipos (*hardware*) de manejo de señales como transmisores transductores, controladores y equipo de entrecara para computadoras.

TRANSMISIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS

La señal analógica es continuamente variable en un intervalo específico, y la magnitud de la señal representa el valor numérico de la variable transmitida. El tipo más común de transmisión analógica de proceso es el neumático.

Transmisión de señales neumáticas La transmisión neumática utiliza normalmente de 20.7 a 103.4 kPa (3 a 15 lbf/in^2) de presión de aire para representar las variables de proceso. Los retrasos de la señal en líneas prolongadas y los efectos del volumen del dispositivo de terminación, por ejemplo, el accionador de válvula neumática, tienen una importancia especial en la transmisión neumática. La calidad del control en un circuito de control neumático se ve afectada profundamente cuando la constante de tiempo de la señal es sustancial en comparación con la constante de tiempo del proceso.

Las curvas ilustradas en la figura 22-138 muestran las respuestas de presión aproximadas a un cambio de escalón en una señal neumática de control, en la entrada de líneas de transmisión neumática usuales con diferentes volúmenes terminales. Los volúmenes terminales en algunos circuitos de control pueden ser mayores que 0.016 m^3 (1000 in^3). En la figura 22-139 se muestra el efecto de la longitud de la línea de transmisión neumática.

Un método para evitar que las constantes de tiempo de transmisión sean grandes consiste en utilizar controladores y posicionadores de válvula montados en el sitio de trabajo. El controlador montado en el sitio de trabajo elimina las grandes distancias de transmisión dentro del circuito cerrado, como se ilustra en la figura 22-140. También se utiliza un posicionador de válvula para reducir más aún la constante de tiempo de un volumen terminal grande de un accionador de diafragma de válvula.

El retraso de la transmisión en un circuito cerrado se elimina con frecuencia en los sistemas de control con computadora, utilizando cálculos de tipo predictivo. Considérese el control de un gasto de reflujo interno en una columna de destilación, con una computadora neumática. Un método de control consiste en computar el reflujo interno R_I para utilizarlo como medición del controlador, como se ilustra en la configuración de retroalimentación de la figura 22-141. Esto hace que la computadora de ubicación remota quede dentro del circuito de retroalimentación, colocando dentro del circuito de control de flujo las largas líneas de transmisión de la señal de control y medición, y sus constantes de tiempo. Por lo tanto, las correcciones de las perturbaciones que afectan el flujo se deben manejar a través de las grandes constantes de tiempo de transmisión.

El método predictivo se ilustra en la configuración en cascada que aparece en la figura 22-141. La computadora predice el gasto de reflujo externo y queda fuera del circuito de control de flujo secundario montado en el sitio de trabajo, con sus líneas de transmisión mucho más cortas. Así, pues, las perturbaciones que no sean las que afectan a ΔT

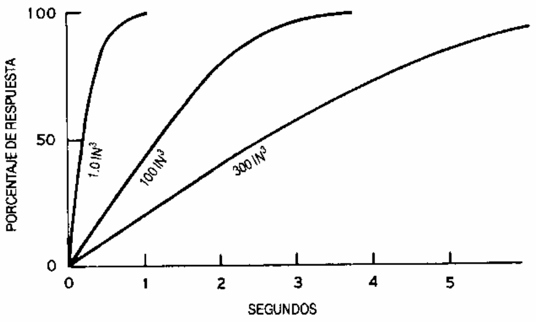


FIG. 22-138 Respuesta de varios volúmenes finales a una entrada neumática escalonada a través de una tubería de ¼ in y 200 ft (61 m) de longitud.

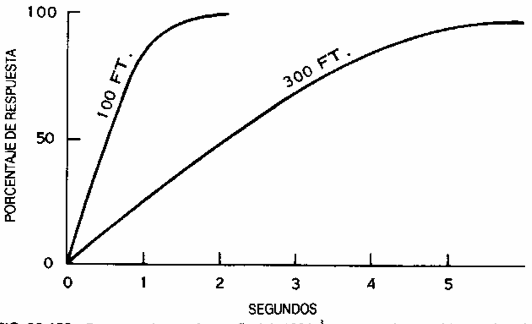


FIG. 22-139 Respuesta de un volumen final de 100 in^3 a una entrada neumática escalonada a través de la longitud indicada de una tubería de $^1/_4$ in.

se regulan por medio de un circuito de control con constantes de tiempo breves, siendo el circuito secundario de un sistema de control en cascada.

Métodos electrónicos de transmisión analógica Los sistemas electrónicos de transmisión analógica utilizan alguna forma de señal eléctrica para representar el valor transmitido. Los tipos más comunes de representación emplean corriente, voltaje, cambio de fase o frecuencia.

Transmisión de corriente Un sistema de transmisión de corriente eléctrica emplea normalmente una corriente continua proporcional a la variable transmitida. Los intervalos de corriente más comunes para el control de procesos son de 1 a 5, de 4 a 20 y de 10 a 50 mA. La trayectoria de transmisión es un circuito de dos conductores que pueden recorrer una distancia relativamente grande. El dispositivo transmisor de la corriente puede ser un transmisor de flujo, presión, nivel o temperatura, una computadora analógica o un convertidor digital a analógico. La fuente de energía puede formar parte del transmisor o del receptor, o bien, ser una unidad independiente.

Un circuito de control usual cuenta comúnmente con un controlador electrónico de tipo automático, con una salida de corriente y una válvula de control que funciona por medio de un actuador de válvula de diafragma-motor de tipo neumático. En este tipo de instalación, el transductor-transmisor de corriente a presión debe ubicarse cerca del accionador, como se indica en la figura 22-142, de tal modo que se evite una transmisión neumática prolongada.

En la figura 22-143 se presenta la ilustración de un circuito transmisor de corriente con salida de computadora analógica. Se utiliza un amplificador operacional como convertidor de voltaje a corriente, ya que la salida de corriente es proporcional al voltaje aplicado al amplificador. La salida de corriente no es afectada por las variaciones en la impedancia de la línea y la impedancia de entrada del receptor. Para el circuito ilustrado, cuando $e_1 = 0$ para 10 V, $i_b = 1$ mA y $R_1 = 2500$ Ω, la corriente de salida i es de 1 a 5 mA. Véase el texto relacionado con la figura 22-104, en la subsección "Controladores electrónicos", en donde se da una descripción más detallada.

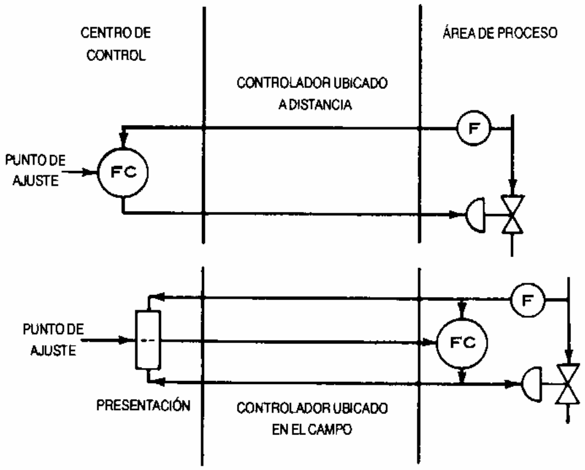


FIG. 22-140 Reducción de los retrasos en la transmisión neumática de circuito cerrado, utilizando un controlador montado en el sitio de trabajo para sustituir al controlador remoto.

En general, los
ces, ya que no so
de la línea y el re
nos afectada por
tricos.

Transmisión
de transmisión a
un voltaje de cc
la señal de volta
de transmisión,

iente con un con-
ına salida de co-
por medio de un
ıo neumático. En
sor de corriente a
no se indica en la
nsmisión neumá-

ón de un circuito
ıtadora analógi-
ımo convertidor
riente es propor-
La salida de co-
a impedancia de
ptor. Para el cir-
mA y R_1 = 2500
ase el texto rela-
ón "Controlado-
pción más deta-

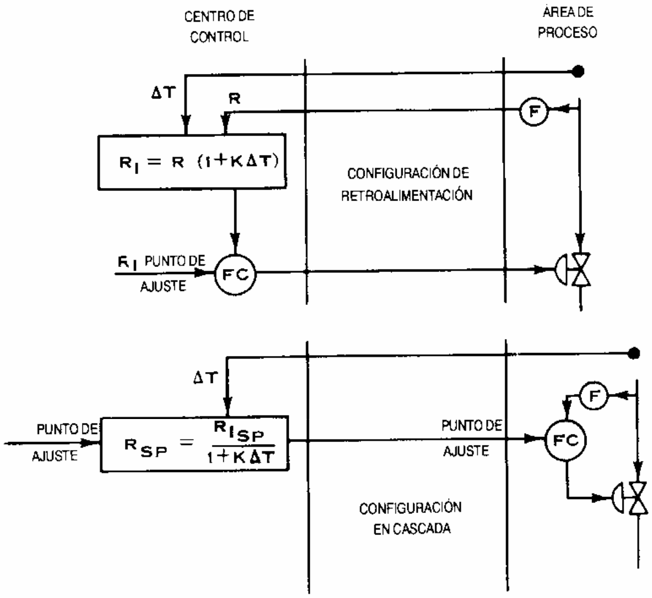


FIG. 22-141 Reducción de los retrasos en la transmisión neumática de circuito cerrado en un controlador neumático de computadora, que sirve para controlar la velocidad del reflujo interno en un fraccionador, conectando la computadora en la configuración en cascada en lugar de hacerlo en la configuración de retroalimentación de la variable computada.

En general, los métodos de transmisión de corriente son muy eficaces, ya que no son afectados por cambios pequeños en la impedancia de la línea y el receptor. La señal de corriente de alto nivel resulta menos afectada por los ruidos captados, que algunos otros sistemas eléctricos.

Transmisión de una señal de voltaje En casi todos los sistemas de transmisión analógica de voltaje, la señal se representa mediante un voltaje de cc proporcional a la variable transmitida. Puesto que la señal de voltaje se atenúa por medio de la impedancia de la línea de transmisión, no es aconsejable utilizar transmisiones de voltaje de cc a largas distancias. En la figura 22-144 se ilustra un sistema de transmisión de voltaje. Nótese que la alta impedancia de entrada del receptor reduce el efecto de la impedancia de la línea de transmisión, pero incrementa la importancia de la capacitación de corrientes dispersas, ya que el nivel de la corriente de línea es reducido.

Los dispositivos de transmisión de voltaje se emplean para transferir muchos tipos de mediciones de proceso a lugares remotos. Si se tiene el cuidado debido en el blindaje y la conexión a tierra, se llega incluso a transmitir con todo éxito señales de unos cuantos milivolts. Por ejemplo, una operación muy común es la medición directa de voltajes de

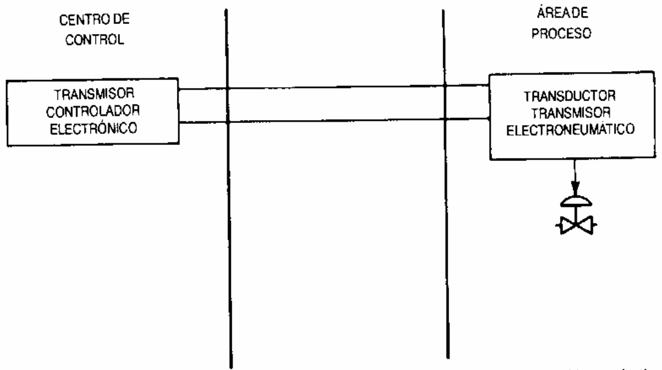


FIG. 22-142 Combinación de controlador electrónico y transductor-transmisor electroneumático, en donde el transmisor neumático queda cerca del accionador de la válvula de proceso.

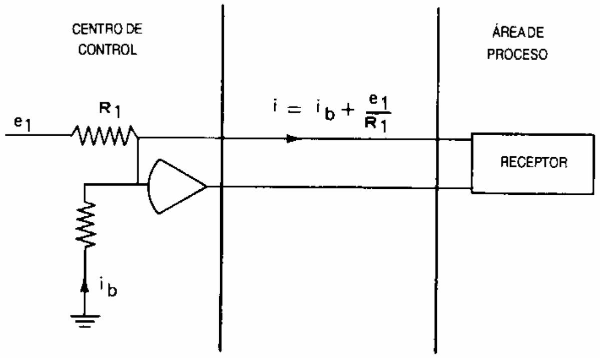


FIG. 22-143 Ejemplo usual de un sistema de transmisión de computadora analógica con salida de corriente.

termopar en el centro de control, cuando los termopares están situados a distancias considerables de dicho centro.

Sistemas de transmisión de frecuencia La información analógica de procesos se puede transmitir generando una señal de amplitud constante de una frecuencia proporcional a la variable medida. El receptor es un dispositivo sensible a la frecuencia capaz de convertir la señal en una forma utilizable. La señal de frecuencia se transmite por alambre o por medio de ondas portadoras de radio de alta frecuencia modulada. Los sistemas de transmisión de frecuencia son muy apropiados para la transmisión a grandes distancias.

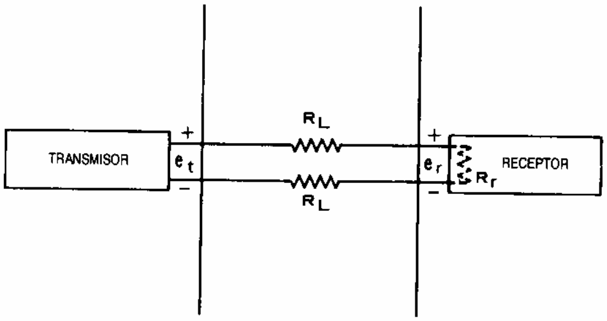
Sistemas de transmisión mediante pulsos La información analógica de procesos se transmite también en forma de pulsos de voltaje o corriente. El método más común es la transmisión de frecuencia pulsátil, que se relaciona íntimamente con los métodos de transmisión de frecuencia antes mencionados. La velocidad de transmisión de los pulsos es proporcional a la señal analógica. Con frecuencia, los sistemas de frecuencia pulsátil se emplean en operaciones de mezclado y línea, ya que es factible utilizar un dispositivo de conteo de pulsos relativamente simple para indicar la acumulación total del flujo.

Hay otros métodos para comunicar información analógica aplicando la técnica de pulsos, que incluyen la representación del valor analógico por medio de la amplitud, la anchura o el tiempo de iniciación del pulso. Todos los métodos relacionados con la transmisión de pulsos utilizan la transmisión por alambre directo o por medio de ondas de radio portadoras moduladas. En la figura 22-145 se ilustran las relaciones entre una señal analógica y las señales de pulso correspondientes que son apropiadas para la transmisión.

TRANSMISIÓN DE SEÑALES DIGITALES

Telemetría digital y transmisión de datos Las técnicas de transmisión digital se emplean para comunicar información del proceso a la computadora, de la computadora al proceso y de una computadora a otra. Los enlaces de comunicación emplean técnicas que varían desde las señales de cc de tipo telegráfico, hasta los sistemas complejos de ondas de radio portadoras moduladas de mayor complejidad, incluyendo los enlaces de microondas. En la figura 22-146 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de transmisión digital.

La forma más común y sencilla de código de transmisión digital es la binaria. Los tres métodos para transmitir información binaria son la manipulación del cambio de amplitud, la del cambio de frecuencia y la del cambio de fase. La manipulación del cambio de amplitud uti-



$$e_r = e_t\left[\frac{R_r}{R_r + 2R_L}\right]$$

FIG. 22-144 Transmisión de voltaje en el régimen de cc, en donde e_t es el voltaje transmitido, e_r el voltaje recibido, R_L la resistencia de la línea de transmisión.

liza la presencia o
manipulación del c
tas para representa
un cambio en la fas
Además de los c
códigos de niveles
último caso, la señ
contraposición co
Aunque se han util
les, los problemas
casi siempre se pr
El descodificado
sente o no. Una se
mayor que 0.5, con
de interpretación; s
cada intervalo de t
una descodificació
se denota un 0, en
encima de 0.75 es
el doble de precisi
ruido puede origin

ansmisión de pulsos
medio de ondas de
ilustran las relacio-
so correspondientes

s Las técnicas de
ır información del
l proceso y de una
ción emplean téc-
telegráfico, hasta
adoras moduladas
s de microondas.
de bloques de un

nsmisión digital es
mación binaria son
mbio de frecuencia
pio de amplitud uti-

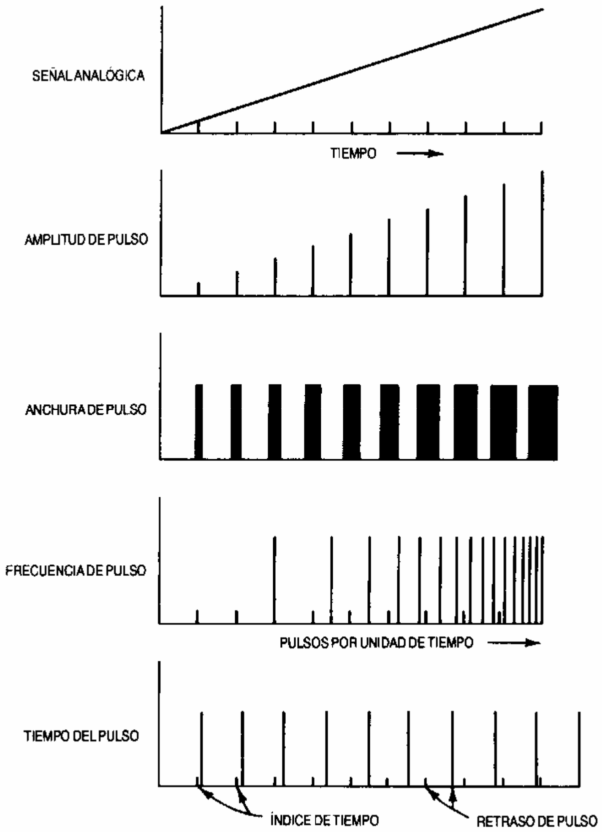


FIG. 22-145 Representación de una señal analógica mediante técnicas de pulso.

liza la presencia o la ausencia de una señal para designar 1 o 0. La manipulación del cambio de frecuencia emplea dos frecuencias distintas para representar 1 o 0, y la manipulación del cambio de fase utiliza un cambio en la fase de la señal para denotar 1 o 0.

Además de los códigos binarios de dos estados, es factible utilizar códigos de niveles múltiples para transmitir datos digitales. En este último caso, la señal puede adoptar tres o más niveles discretos, en contraposición con los dos niveles de la representación binaria. Aunque se han utilizado sistemas de transmisión hasta con 32 niveles, los problemas de recodificación y ruido son muy importantes y casi siempre se prefiere utilizar una cantidad menor de niveles.

El descodificador binario debe determinar sólo si hay una señal presente o no. Una señal inferior a 0.5 se designa como 0 y cuando es mayor que 0.5, como 1. Sólo los ruidos graves pueden originar un error de interpretación; sin embargo, sólo se transmite un *bit* binario durante cada intervalo de tiempo t_1 a t_2. El código de cuatro niveles requiere una descodificación más compleja. Cuando la señal es menor que 0.25, se denota un 0, entre 0.25 y 0.50 es 1, entre 0.50 y 0.75 es 2, y por encima de 0.75 es 3. Puesto que el descodificador debe interpretar con el doble de precisión que un descodificador binario, la captación de ruido puede originar muchos más errores. No obstante, la señal de cuatro niveles transmite 2 *bits* binarios durante cada intervalo de tiempo y, por ende, es dos veces más rápido.

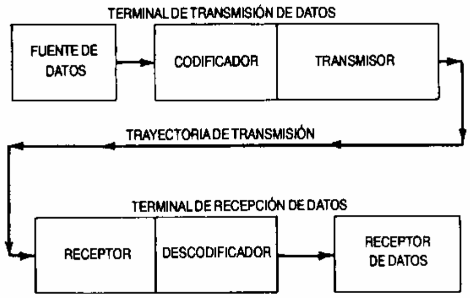


FIG. 22-146 Sistema de transmisión de datos digitales.

Transmisión de datos de computadora a computadora El empleo de sistemas jerárquicos de control de proceso con varias computadoras requiere la transferencia de información entre varias de ellas. El análisis detallado de la comunicación de computadora a computadora debe incluir una descripción del equipo de entrada-salida de la computadora; sin embargo, en esta subsección sólo se cubrirán los conceptos básicos.

El intercambio de datos entre computadoras puede clasificarse ampliamente como transmisión en paralelo o en serie. Un enlace paralelo consta de una línea por cada *bit* de palabra digital, además de líneas adicionales para emitir o recibir instrucciones u órdenes. Todos los *bits* de una palabra de dato se transfieren simultáneamente, de tal manera que el tiempo de transferencia de una palabra de dato es el mismo que el tiempo correspondiente a un solo *bit*. La transferencia de datos en paralelo por medio de un cable coaxial constituye un método veloz y confiable; sin embargo, los costos del cable en paralelo adquieren una importancia preponderante a distancias mayores de 120 a 150 m (400 o 500 ft).

La transmisión de datos en serie requiere un solo enlace de datos entre las computadoras, pero es mucho más lenta, ya que la palabra de dato se transfiere *bit* por *bit*. Los sistemas en serie se dividen en tres clases: el sistema símplex, en donde las señales de datos y control fluyen en una sola dirección; el sistema medio dúplex, en donde las señales fluyen en ambas direcciones, pero no en forma simultánea; y el sistema dúplex completo, que es una transmisión simultánea en dos sentidos.

La transmisión de datos entre computadoras se clasifica como de tipo sincrónico, cuando los datos se transfieren con una velocidad constante; y asincrónico, cuando no tienen una velocidad constante. La velocidad de transferencia de datos está siempre limitada por las capacidades de la computadora más lenta.

ORGANIZACIÓN DEL EQUIPO PARA CONTROL DE PROCESOS

El equipo de control de procesos está sufriendo una rápida transformación a consecuencia de los avances en la tecnología de los microprocesadores, a tal grado que ya existe gran variedad de formas nuevas y organizaciones funcionales. Una variable de proceso con el último equipo es más apta para ser presentada e introducida en forma digital que registrada en un registrador de gráfica de tira o variada al girar una perilla. Una "caja" o bloque puede ser programada por el usuario para que realice varias funciones de control singulares y/o relacionadas o, más comúnmente, puede ser diseñada por el fabricante para que ayude a una fácil selección de una o más funciones ya programadas.

Las mejoras más significativas en el rendimiento de los sistemas de control se han efectuado en situaciones de control difícil, mediante el control digital por computadora. Debido a su alto costo inicial, las computadoras para control deben mantenerse en funcionamiento tanto tiempo como sea posible mediante la asignación de diversas tareas. En efecto, la operación adecuada de gran parte de la planta llega a ser dependiente de la computadora.

Cuando el computador para control del proceso falla o funciona en forma deficiente durante una operación de manufactura, el resultado inmediato es casi siempre un trastorno en el proceso y un gasto excesivo en el tiempo del personal de operación, a fin de contrarrestar los efectos de ese trastorno y poder restablecer el trabajo normal en la planta. En algunas ocasiones es necesario contar con equipo de control manual para los periodos de paro muy prolongados, lo que de cualquier forma da como resultado una pérdida en la atención a la operación debido a las tareas normales del operador.

La confiabilidad relativamente alta de un computador para control digital tiende a complicar el problema de una falla. Cuando el equipo está ejecutando un excelente trabajo de control con poca o ninguna intervención del operador y de manera repentina ocurre una falla, la respuesta del operador es cercana al pánico, ya que en ese momento el operador ha olvidado las medidas que debe aplicar debido a la falta de experiencia reciente.

Este equipo nuevo es capaz de superar los mayores problemas operacionales originados por la aplicación de computadores digitales al control de procesos; por ejemplo, una falla en un componente aislado en la computadora puede ser causa de la falla de muchas partes del sistema, inoperable a menos que se cuente con un adecuado sistema de retroalimentación de capacidad similar. Esta solución se tiene como resultado del costo reducido de los microprocesadores más su capacidad para controlar las entrecaras de comunicación en forma independiente. En efecto, el empleo de gran número de computadoras digitales casi independientes (microprocesadores), ha llegado a ser económico y factible para controlar el proceso mediante técnicas de comunicación de interprocesadores para asegurar la coordinación total. Cada elemento de procesamiento superior podría contener su propio microprocesador, por lo que su falla no afectaría necesariamente el funcionamiento del resto del sistema.

En efecto, tal equipo podría tener las propiedades deseables de **1**) limitar el impacto de una falla, debido a la pequeña extensión de la responsabilidad; **2**) hacer posible reparar las fallas más rápidamente, ya que se pueden remover los ensambles funcionales sin que el resto del sistema sufra perturbaciones; **3**) incrementar el empleo de partes comunes, y reducir el costo de las partes individuales; y lo más importante, **4**) retener las capacidades computacionales y de manejo de tiempo de las computadoras digitales.

A continuación se exponen los antecedentes que apoyan las técnicas para mejorar la disponibilidad y facilidad de reparación del equipo analógico; después, se presentarán las técnicas de los computadores para control digital y los problemas relacionados con el alcance de las mismas metas. Finalmente, se proporcionará un ejemplo de las técnicas disponibles para hacer funcionar los microprocesadores, para obtener mayor disponibilidad y facilidad de reparación del equipo digital.

Sistemas de control analógico En general, los controles analógicos se construyen con bloques de función sencilla conectados por tubos neumáticos que transportan la señal analógica, o por cables que transportan la corriente o el voltaje de las señales analógicas. El diseño de estos sistemas consiste en determinar los tipos e intervalos de las variables de proceso, el escalamiento de las señales del módulo de la función y la interconexión de los bloques adecuados que se requieren para el propósito de control.

En la figura 22-147 se muestra un sistema de control analógico. El ciclo de control está destinado a mantener un gasto o velocidad de flujo constante, dentro de la capacidad de la válvula para controlar ese flujo.

Una placa de orificio o cualquier otro tipo de restricción se coloca en la trayectoria de flujo y se utiliza un transmisor de presión diferencial para medir la caída de presión a través de la placa de orificio como una función de la velocidad de flujo. Gracias a otros datos del proceso, se sabe que el flujo tendrá una variación de 0 a 200 volúmenes por minuto. Para mayor claridad, considérese que el intervalo de caída de presión de la placa de orificio es de 0 a 125 unidades de agua para esta cantidad de flujo.

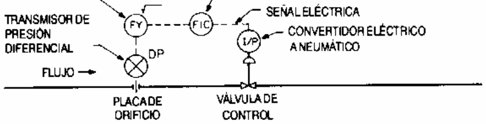


FIG. 22-147 Control de flujo con un controlador analógico.

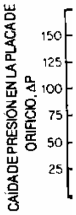


FIG. 22-148 Flujo

En la figura 22-1
te por la placa de
diferencial cuando
de presión (es ne
eléctrica analógica

Se utiliza un e
de presión difere
el flujo. La salid
drada correspon
este ejemplo.

Finalmente, la
controlador, que
mático. El conve
la válvula.

El escalamient
del transmisor de
el valor del flujo
trolador tendrá g
de escala comple
del punto de ajus
intervalo conven
minuto, y el trans
do con esto.

La salida del co
de salida para im
el punto de ajuste.
resultado un cier
que el descenso e
der que la válvula
tura total cuando
medición del fluj

ocurre una falla, la
: en ese momento el
: debido a la falta de

ıres problemas ope-
ıladores digitales al
:omponente aislado
: muchas partes del
ıdecuado sistema de
ıción se tiene como
lores más su capaci-
ión en forma inde-
le computadoras di-
), ha llegado a ser
ıediante técnicas de
· la coordinación to-
lría contener su pro-
ıría necesariamente

des deseables de 1)
eña extensión de la
ıs más rápidamente,
ales sin que el resto
el empleo de partes
les; y lo más impor-
y de manejo de tiem-

que apoyan las téc-
l de reparación del
écnicas de los com-
relacionados con el
: proporcionará un
uncionar los micro-
ıd y facilidad de re-

ıs controles analógi-
a conectados por tu-
ca, o por cables que
ınalógicas. El diseño
s e intervalos de las
les del módulo de la
los que se requieren

: control analógico,
n gasto o velocidad
válvula para contro-

restricción se coloca
r de presión diferen-
aca de orificio como
os datos del proceso,
200 volúmenes por
intervalo de caída de
les de agua para esta

N INDICACIÓN DE FLUJO DE
IONAL MÁS INTEGRAL
RICA
TIDOR ELÉCTRICO
ÁTICO

ógico.

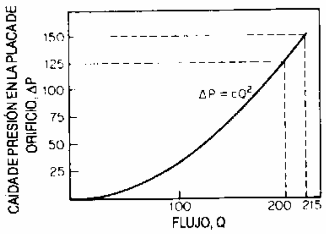


FIG. 22-148 Flujo en función de la caída de presión en la placa de orificio.

En la figura 22-148 se muestra la señal que es desarrollada realmente por la placa de orificio; en consecuencia, el transmisor de presión diferencial cuando la variación es de 0 a 150 unidades de agua de caída de presión (es necesario ampliar el intervalo), producirá una señal eléctrica analógica que no es lineal con el flujo.

Se utiliza un extractor de raíz cuadrada para linealizar la señal de presión diferencial, para que esa señal de salida sea lineal con el flujo. La salida en escala completa del extractor de raíz cuadrada corresponderá a 219 volúmenes por minuto del flujo para este ejemplo.

Finalmente, la señal de la raíz cuadrada se aplica como entrada al controlador, que a su vez manipula un convertidor eléctrico a neumático. El convertidor suministra la señal de aire al accionador de la válvula.

El escalamiento de las señales se determinó cuando el intervalo del transmisor de presión diferencial fue seleccionado y se calculó el valor del flujo resultante. La escala analógica en la cara del controlador tendrá graduaciones lineales y se establecerá un intervalo de escala completa de 0 a 219 volúmenes por minuto (el intervalo del punto de ajuste será el mismo). Por regla general, se utilizará un intervalo conveniente para el operador de 0 a 250 volúmenes por minuto, y el transmisor de presión diferencial se calibrará de acuerdo con esto.

La salida del controlador supondrá que es necesario cualquier nivel de salida para impulsar la medición del flujo en correspondencia con el punto de ajuste. El incremento del flujo por causas externas da como resultado un cierre en la válvula que está siendo accionada, mientras que el descenso en el flujo provoca que la válvula se abra. Puede suceder que la válvula sea impulsada hacia el estado de cierre total o apertura total cuando el controlador intenta mantener la equivalencia en la medición del flujo y el punto de ajuste.

Las siguientes preguntas corresponden al momento de diseñar un sistema de control:

1. ¿En qué condiciones se encuentran el transmisor de presión diferencial, el extractor de raíz cuadrada, el controlador y el convertidor eléctrico a neumático, para calibrarse o utilizarse tal como se adquieran?

2. ¿Cuál será el mejor comportamiento del sistema si un módulo falla?

Los sistemas de control analógico han dado respuesta satisfactoria a la primera pregunta al proporcionar a cada controlador un control independiente y una fuente independiente de presentación de la señal, a fin de poder manipular la señal de salida del controlador. Esta fuente de control independiente se conoce como estación automanual y, siempre que el controlador se coloque en posición de operación manual, la señal de la válvula será ajustada por el operador y el equipo corriente arriba de la estación manual, incluido el controlador, puede seguir funcionando. El convertidor eléctrico a neumático requerirá que la válvula de control sea puesta fuera de operación para que el convertidor pueda funcionar.

La segunda pregunta ha tenido respuesta en los sistemas de control analógico al minimizar la sensibilización al deterioro por fallas. En la práctica, se lleva a cabo un intento para obligar a la válvula a ir hasta una posición segura en el momento en que suceda una falla. Por ejemplo, si el aire de un instrumento se pierde y la posición de seguridad de la válvula es al cierre, deberá contarse con un accionador de válvula que requiera un incremento en la señal de aire para abrir la válvula. Un criterio semejante puede aplicarse a los otros componentes, ya que los módulos de función pueden adquirirse con salidas de acción directa o inversa.

En resumen, los sistemas de control analógico han limitado los daños a los instrumentos en caso de falla al utilizar módulos sustituibles para los arreglos de los circuitos de control, al proporcionar una estación de control independiente final y utilizar una estrategia de falla-seguridad cuando ello sea práctico.

Sistemas de control por computadora digital Los sistemas de control por computadora digital son comparables directamente con el sistema de control analógico de la figura 22-147, y se muestra en la figura 22-149. La señal del transmisor de presión diferencial va directamente al convertidor analógico a digital del sistema de control por computadora. La señal convertida se linealiza internamente a través de una rutina de extracción de raíz cuadrada y se suministra como entrada a un algoritmo de control proporcional más integral (véase la subsección "Controladores de microprocesador"). La salida del algoritmo se envía al convertidor digital a analógico, donde se convierte en una señal eléctrica representativa que sirva para impulsar el convertidor neumático a eléctrico.

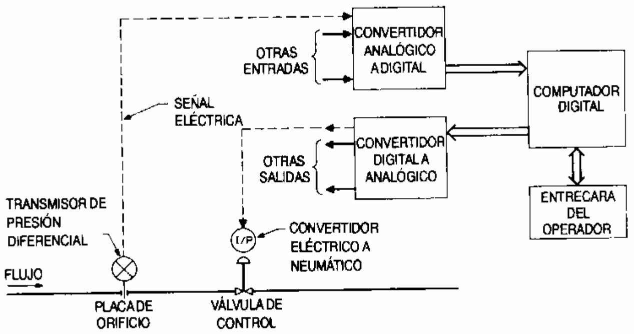


FIG. 22-149 Control de flujo con un computador digital.

La medición del proceso, el valor del punto de ajuste y los valores de salida del controlador se obtienen a través del equipo de entrecara del operador. Este sistema de control se conoce como "control digital directo", ya que el sistema computador manipula de manera directas la señal de la válvula.

La comparación del sistema de control digital directo con las capacidades de los primeros sistemas de control analógico, demuestra que se tienen las mismas capacidades, excepto en lo que se refiere a la estación manual para el control de la válvula en el caso de que el computador o cualquier equipo anterior al computador necesite ser calibrado o utilizado en las condiciones en que se encuentre. Esta capacidad se proporciona en tres formas:

1. Con una estación manual de respaldo para el control de la válvula.

2. Con un controlador analógico de respaldo para el control de la válvula.

3. Los circuitos de control que manipulan directamente las válvulas son restringidos a la tarea de controladores analógicos con el computador suministrando sólo los valores del punto de ajuste.

La opción 3 se conoce normalmente como "sistema de control de supervisión". En cada caso se proporcionan los medios para contrarrestar la señal generada por el computador.

Los ciclos de control básico analizados no indican cuál es el significado real de la falla del equipo en los sistemas de control de la computadora. Los sistemas de control por computadora se instalan con objeto de resolver los problemas de control que no pueden superarse con un equipo analógico; en consecuencia, cuando se pierde un computador, aunque se piense que los controladores de respaldo continúan manteniendo las variables del proceso en el último valor, lo cierto es que el manejo eficaz del proceso se pierde, ya que la parte más compleja del sistema de control está perdida.

Por lo general, la compostura de un computador digital requiere que el computador se ponga a disposición total del servicio de reparación. Este requisito debe cumplirse sin reparos, ya que el equipo relacionado con la computadora suele ser pasivo, excepto bajo el comando de un programa almacenado. En consecuencia, para revisar el equipo durante la verificación de fallas, se requiere una unidad central de procesamiento. La mayor parte de los programas de diagnóstico se construyen para operar sólo como los únicos programas residentes en la computadora.

Los computadores de respaldo se han instalado para precisar la pérdida de capacidad. Estas unidades de respaldo pueden o no destinarse al control. En cualquier caso, los datos reales del proceso deben transmitirse de manera constante a la unidad de respaldo y es necesario adoptar una estrategia adecuada de arranque o una consecución dual de datos, con las entrecaras del equipo (*hardware*) accesibles en ambos computadores. En particular, las estrategias automáticas de transferencia al equipo de respaldo son adecuadas sólo para los tipos más obvios de fallas.

Desde el punto de vista de los costos de desarrollo y mantenimiento, estos enfoques no son satisfactorios a causa de la presencia de equipo redundante o no utilizable y por la programación requerida para manejar el equipo adicional.

Sistemas de control distribuido por microprocesador Las objeciones operacionales para utilizar los computadores de control digital surgen a partir de las siguientes razones:

1. Puede perderse buena parte de la capacidad de control a consecuencia de la falla de un componente individual.

2. Un sistema de respaldo o apoyo para retener la capacidad de control completo es casi tan costoso como el sistema primario.

3. Una reparación eficaz requiere que el computador sea puesto fuera de servicio.

Los microprocesadores pueden emplearse para superar estas objeciones al tiempo que se conservan todas las capacidades de los computadores de control digital. Es posible lograr esto gracias a la versatilidad de un microprocesador como controlador y la gran reducción en el costo de los dispositivos semiconductores.

La primera objeción puede superarse al asignar secciones relativamente pequeñas de cada sistema controlado a un controlador sencillo (p. ej., un microprocesador), que podría seguir realizando la función de control hasta que se tenga una orden de cambio. Los circuitos de control en cascada y de interacción se asignan al mismo controlador. En consecuencia, la falla de un microprocesador sólo podría afectar los circuitos controlados por ese microprocesador.

El costo del sistema de respaldo (objeción 2) se podría reducir ya que el equipo de computación (*hardware*) sería idéntico para todos los controladores y los casos específicos se determinarían por el programa. De lo anterior se puede inferir que sólo se necesita tener un tipo de dispositivo en el almacén y este dispositivo sería relativamente barato, comparado con el sistema completo.

El problema de la reparación surgido de la objeción 3 podría superarse también. La posibilidad de sustituir controladores de manera rápida, permite que la reparación fuera de línea se pueda llevar a cabo sin poner fuera de servicio el sistema de control.

En este análisis se han ignorado, hasta ahora, las preguntas sobre las intercomunicaciones del controlador y las entrecaras del operador; sin embargo, es necesario proporcionar algunos lineamientos para la interconexión de unidades de impulso de microprocesador. Algunos lineamientos son los siguientes:

1. La falla de una unidad sencilla no debe perjudicar las operaciones de otra unidad, excepto en relación con la pérdida de datos.

2. El equipo que sufre una falla puede desconectarse, quitarse y reemplazarse con nuevas unidades sin dañar la operación de otras unidades.

3. Debe disponerse de datos básicos, al menos de dos fuentes.

El sistema que se muestra en la figura 22-150 abarca los tres lineamientos si se presta la atención adecuada al diseño del equipo y a los programas de computación (*hardware* y *software*). Al proporcionar una trayectoria de comunicación individual entre cada controlador y la estación con operador se mantiene un alto grado de aislamiento y facilidad de sustitución entre los componentes. Los datos de control básicos pueden transferirse a través de la estación con operador o a través de una conexión redundante de medición.

Cada controlador transmite de manera asincrónica datos selectos hacia las estaciones con operador. Cada controlador dispone del tiempo suficiente para permitir las transmisiones de la estación con operador. Como sólo se incluyen pequeñas cantidades de datos entre cada línea de comunicación, las velocidades de transmisión de datos por línea son bajas con un incremento correspondiente en la inmunidad al ruido.

Todas las órdenes o instrucciones emitidas por la estación con operador son devueltas a cada operador para permitirle la actualización del estado de las mismas. No es necesario contar con destinos y códigos de fuentes, puesto que las direcciones son determinadas por la conexión con cables. Sin embargo, en cada mensaje debería añadirse el código para la verificación de errores. Los datos malos serían etiquetados en la pantalla de la estación con operador con tipos de caracteres especiales y los datos no actualizados etiquetados con otra identificación especial.

El programa (*software*) de la estación con operador permite que los datos malos de los controladores sean anulados sólo con operaciones del operador en el teclado. La recepción de datos emitidos desde cualquier controlador puede ser detenida también con una instrucción del operador en el tecleado.

Cada controlador debería equiparse con un teclado y una pantalla que permita exhibir el contenido de la memoria en cualquier momento. Este equipo se destina en primer lugar a su utilización por el trabajador de servicio cuando repara y calibra el equipo.

La estación manual de cada controlador no necesita ser una pieza separada del equipo (*hardware*), pero sería conveniente que pudiera manipularse por medios independientes del microprocesador.

Aún podrían plantearse proposiciones adicionales como las contenidas en los últimos párrafos; todas ellas podrían afectar sólo una pequeña parte del sistema de control y poder repararse sin afectar el resto del sistema, además de que se deben proporcionar los medios para seguir en operación continua mientras se efectúan las reparaciones.

El control de proc
general del control
en la perspectiva a
más amplio del qu
El objetivo final
ma extremadamer
mar una compañí
comprende comp
putadoras a vario
interés primordial
tos, la informació
relacionadas con
puedan relacionar
de la ingeniería m
Para lograr la p
intercomunicació
de tomarse como

JERARQUÍA DI

Hay cinco niveles
1. *Control de l*
aspecto u objeto i
un intercambiado
2. *Control del*
de operaciones u
deben coordinar

secciones relativa-
›ntrolador sencillo
alizando la función
io. Los circuitos de
nismo controlador.
lo podría afectar los

odría reducir ya que
› para todos los con-
por el programa. De
er un tipo de dispo-
mente barato, com-

ción 3 podría supe-
dores de manera rá-
eda llevar a cabo sin

preguntas sobre las
as del operador; sin
mientos para la in-
esador. Algunos li-

icar las operaciones
de datos.
iectarse, quitarse y
operación de otras

se dos fuentes.
barca los tres linea-
o del equipo y a los
e). Al proporcionar
cada controlador y
do de aislamiento y
os datos de control
n con operador o a

i datos selectos hacia
one del tiempo sufi-
con operador. Como
cada línea de comu-
r línea son bajas con
uido.
stación con operador
ualización del estado
/ códigos de fuentes,
onexión con cables.
código para la verifi-
s en la pantalla de la
ciales y los datos no
ecial.
idor permite que los
ólo con operaciones
mitidos desde cual-
una instrucción del

lado y una pantalla
cualquier momento.
ión por el trabajador

cesita ser una pieza
eniente que pudiera
procesador.
les como las conte-
afectar sólo una pe-
e sin afectar el resto
los medios para se-
s reparaciones.

CONTROL DE PROCESOS POR COMPUTADORA

El control de procesos por computadora forma parte de un tema más general del control por computadora. Para situar el control de procesos en la perspectiva adecuada, es necesario considerar primero el sistema más amplio del que forma parte el control de procesos.

El objetivo final del control por computadora, expresado en una forma extremadamente simplificada, es proporcionar lo que se puede llamar una compañía automatizada. La implantación de este objetivo comprende computadoras de intercomunicación o secciones de computadoras a varios niveles de la organización. En esta exposición, el interés primordial no reside en aspectos como el procesamiento de datos, la información administrativa y la programación de operaciones relacionadas con este último objetivo, excepto en el sentido de que puedan relacionarse con el control de procesos desde el punto de vista de la ingeniería más que de los negocios.

Para lograr la perspectiva deseada, el concepto de computadoras de intercomunicación o secciones de computadoras a varios niveles puede tomarse como una "jerarquía de control por computadora".

JERARQUÍA DEL CONTROL POR COMPUTADORA

Hay cinco niveles que se identifican dentro de la jerarquía del control.

1. *Control de la operación unitaria* Este se ocupa del control de un aspecto u objeto individual de equipo de proceso, como por ejemplo, un intercambiador de calor, un reactor o un secador.

2. *Control del proceso unitario* Se trata del control de un conjunto de operaciones unitarias, cuyas operaciones unitarias individuales se deben coordinar para satisfacer un objetivo específico, por ejemplo, un reformador de gasolina que incluye reactores catalíticos, fraccionadores de productos e intercambiadores de calor.

3. *Control de la planta* Este nivel comprende el control del conjunto de todos los procesos unitarios en una localidad física.

4 y 5. *Niveles de control por departamento y por corporación* Por encima del nivel de la planta o fábrica están los niveles del departamento y la corporación de una compañía. El control de proceso no se ocupa de las operaciones de cualquiera de estos niveles, excepto en el sentido de que algunas salidas de estos niveles son entradas de planta, que son pertinentes para el control de proceso, y algunos datos generados en la misma, como operaciones no estándares o límites de capacidad, son entradas para los dos niveles superiores.

La información que se origina a un nivel menor, se comunica al siguiente nivel superior que, a su vez, genera decisiones o acciones que se transmiten en sentido descendente al nivel inferior. Una consecuencia importante de utilizar un sistema de control es la reducción de los grados de libertad. Por ende, conforme el control a un nivel particular se mejora o se hace más completo, el nivel de control inmediatamente superior requerirá menos información y cuando lo haga, será con menor frecuencia. Para lograr esta función de control, casi siempre sucede que el nivel superior requiere sólo los valores actuales de las variables de funcionamiento provenientes del nivel inmediatamente inferior.

CONTROL DE PROCESOS

Dominio del control de procesos El control de procesos se ocupa de regular operaciones unitarias, procesos unitarios y todos aquellos aspectos del control de planta que se asocien con los objetivos y la

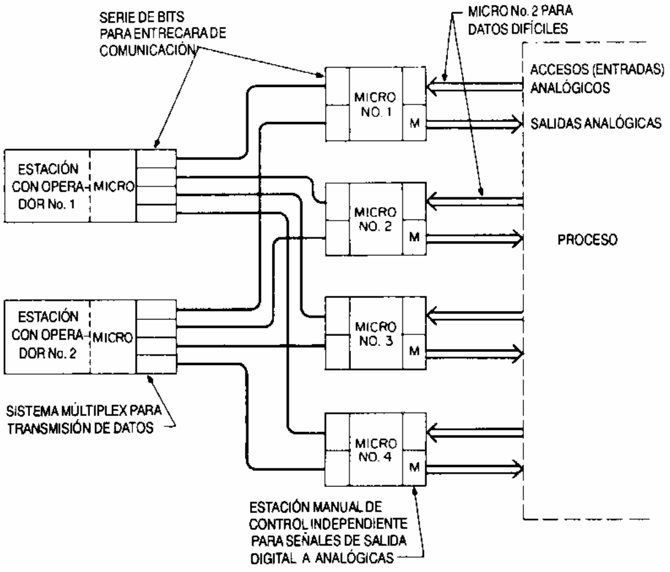


FIG. 22-150 Sistema de control distribuido.

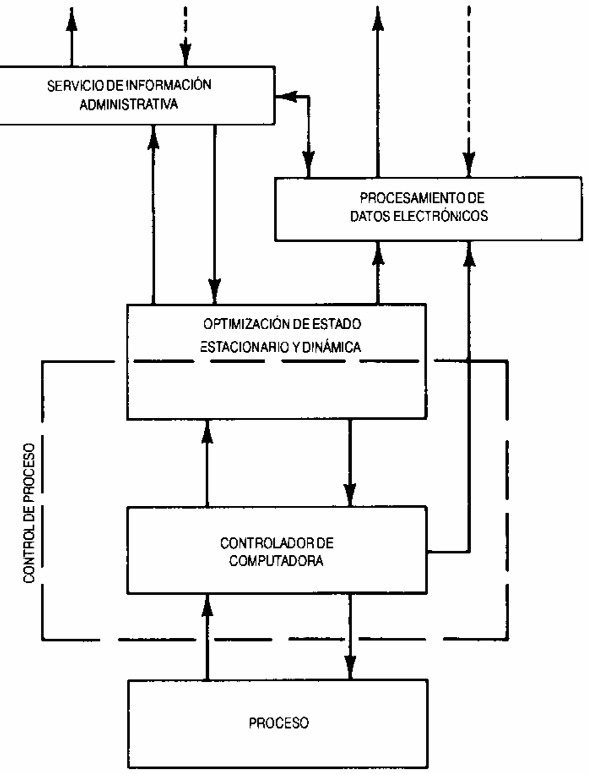


FIG. 22-151 Diagrama simplificado de varias funciones de un sistema de control totalmente computarizado.

eficacia del procesamiento. El control de proceso no se ocupa directamente de decisiones a nivel de planta, como el mantenimiento de la misma, la sustitución del equipo, el envío de productos y aspectos de esta índole, excepto en lo que puedan afectar las variables de funcionamiento de los niveles inferiores, debido al estado de disponibilidad del equipo de procesamiento en línea, la disponibilidad de existencias para la alimentación y la disponibilidad de instalaciones para el almacenamiento de los productos. Del mismo modo, el control de proceso no se preocupa por lo común de las decisiones a nivel departamento o corporación.

Configuraciones computador-operador-proceso Las computadoras se pueden utilizar en una variedad de configuraciones con el proceso y el operador, según el nivel de automatización deseado o justificable. Tales configuraciones cubren un intervalo amplio: el empleo de un dispositivo de computación como ayuda fuera de línea para el operador, la utilización de un dispositivo de computación como auxiliar para un controlador normal, registro de datos en línea y servicio de computación como guía para el operador, sistema automático de control por computadora en línea estableciendo los puntos de referencia de los controladores normales, bajo la supervisión del operador, y la inclusión de todos los controladores dentro de la computadora con el sistema puesto bajo la supervisión del operador.

De todas estas configuraciones, las tres primeras representan las variaciones del control manual del proceso con ayuda de una computadora, y las dos últimas representan el control automático por computadora. Las tres primeras representan el control por computadora, en el sentido de que todos los datos están disponibles para el control de retroalimentación, pero un eslabón en la cadena es la acción de respuesta del operador. Esto representa el control por computadora en el sentido de los negocios, pero no en el sentido de la ingeniería. Las dos últimas representan el control por computadora desde el punto de vista de la ingeniería.

Jerarquía funcional de un sistema de control por computadora de una compañía Si se examina una vez más la jerarquía del control, pero incluyendo en el análisis la computadora o las computadoras, se obtendrá un diagrama semejante al que aparece en la figura 22-151, que representa una descripción funcional del sistema computarizado. La porción del sistema indicado por la caja en líneas punteadas, incorpora lo que generalmente se designa como control de procesos por computadora, desde el punto de vista de la ingeniería. La división indicada entre la optimización de estado estacionario y la dinámica es la separación que depende del proceso que se está controlando y la frecuencia con que se hacen ajustes en dicho proceso. La división puede variar desde el nivel de operación unitaria hasta el nivel de planta, según las condiciones económicas y técnicas, y el punto de vista del diseñador del sistema. Los bloques pueden representar computadoras de comunicacion individuales, o bien secciones de una sola computadora.

En general, las ecuaciones y los modelos de control utilizados en los diversos niveles de la jerarquía de control se caracterizan por una cantidad decreciente de ecuaciones diferenciales o características dinámi-

cas conforme se a
proceso unitario, l
desaparecen norn
proceso es tal que
cionalidad, las ca
orden de jerarquí

En algunas oc
de control por c
figura 22-151 s
guración jerárq
equipo de insta
computadora tie
misma, sin cont
proceso, el cont
la medición difí
to a un nivel jer
ceso que se exti

En el desarrol
nar la acción de
de rendimiento c
se origina en as
orden a la varia
que afectan la va
ficultades han h
fracasen y que lo
ra sean sustanci
permitidas.

La variable d
una razón. Su ra
bles de rendimie
biable los térmi
to o eficiencia,
los niveles de p
operar cualquie
específico a un
restricciones op
fabricación, las
son las variable
trol a cualquier
de libertad del s
rendimiento.

CONTROL DE COMPUTADO

El control por
ción unitaria, c
ractericen por t
tes: 1) no toda
fuera del sisten
cuales no hay
del controlado
bles que sólo ti
mas de control
y controlar las
se podían medi

Reducción d
reactor químico
normales, el op
(velocidad de e
temperatura del
en forma corres
temperatura del
ción, pero la his
respecta a la cal

cas conforme se asciende en el orden de jerarquía. Al llegar al nivel de proceso unitario, la necesidad de las ecuaciones de control dinámico desaparecen normalmente. En procesos futuros en que el diseño del proceso es tal que se requiere un control de computadora para su funcionalidad, las características dinámicas se ampliarán más allá en el orden de jerarquía.

En algunas ocasiones, la descripción funcional de un sistema de control por computadora en operación, como se ilustra en la figura 22-151 se muestra con mayor claridad que en una configuración jerárquica. Una de las razones de ello puede ser que el equipo de instauración del diseño del sistema de control por computadora tiene una orientación encaminada al equipo de la misma, sin contar con la experiencia adecuada en el campo del proceso, el control y la medición. Esta situación puede hacer que la medición difícil se sustituya y se ejerza un control más directo a un nivel jerárquico menor, por medio de un modelo de proceso que se extienda a más de un nivel.

En el desarrollo de este tipo de modelos, a veces es difícil relacionar la acción de control en una válvula particular, con una variable de rendimiento o de desempeño a un nivel superior. Esta dificultad se origina en aspectos como el tiempo muerto, la respuesta de alto orden a la variable de rendimiento, y las perturbaciones múltiples que afectan la variable de desempeño en formas similares. Estas dificultades han hecho que los sistemas de control por computadora fracasen y que los costos de desarrollo de programas de computadora sean sustanciales, sobrepasando las cantidades presupuestales permitidas.

La variable de rendimiento Cada nivel de la jerarquía existe por una razón. Su razón de existencia establece por lo común sus variables de rendimiento. Con frecuencia se emplean en forma intercambiable los términos de variable de rendimiento, índice de rendimiento o eficiencia, objetivo operacional y criterios operacionales. En los niveles de producción de la jerarquía, el propósito básico para operar cualquier proceso es producir, a un costo mínimo, un artículo específico a un volumen de producción requerido, acorde con las restricciones operacionales de la unidad. Usualmente, los costos de fabricación, las calidades del producto y el volumen de producción son las variables de rendimiento o desempeño del proceso. El control a cualquier nivel de jerarquía debe ser tal que reduzca los grados de libertad del sistema hacia cero, con respecto a sus variables de rendimiento.

CONTROL DE LAS OPERACIONES UNITARIAS POR COMPUTADORA

El control por computadora mejora el rendimiento de la operación unitaria, cuando los sistemas con control tradicional se caractericen por todas o cualquiera de las tres condiciones siguientes: **1)** no todas las perturbaciones controlables se mantienen fuera del sistema, **2)** hay perturbaciones no controlables para las cuales no hay una compensación, y **3)** los puntos de referencia del controlador ajustado manualmente se encuentran en variables que sólo tienen un interés indirecto. En el caso de los sistemas de control por computadora, se pueden calcular, especificar y controlar las variables de rendimiento que con anterioridad no se podían medir o controlar.

Reducción de los grados de libertad Como ejemplo, véase el reactor químico que se ilustra en la figura 22-191. Con controladores normales, el operador intenta mantener un volumen de producción (velocidad de elaboración de productos) observando el aumento de temperatura del refrigerante al pasar por la cubierta del reactor, y ajusta en forma correspondiente el flujo del catalizador. Este aumento en la temperatura del refrigerante es una indicación del volumen de producción, pero la historia no se limita a este aspecto únicamente. En lo que respecta a la calidad del producto, la única información de que dispone el operador proviene de un análisis de laboratorio que se corre casi siempre una vez por turno.

En este ejemplo, en que se utilizan controles tradicionales, la operación del reactor es una función de 18 variables independientes. El análisis de las operaciones unitarias controladas más convencionalmente revelará la existencia de una cantidad similar de variables independientes o grados de libertad. Con la existencia típica de tantas variables no controladas, se observa una fluctuación considerable en las variables de rendimiento de las operaciones unitarias.

La técnica para reducir los grados de libertad para este ejemplo de reactor, que se escribe detalladamente en relación con la figura 22-191, es accesible sólo mediante el control por computadora.

Simplificación de las ecuaciones de control Otra característica para reducir los grados de libertad mediante el control, es que las variables de proceso se hacen constantes a través de dicho control. Por ejemplo, para calcular la concentración de producto en el reactor químico ilustrado en la figura 22-191 y en la tabla 22-13, y la ecuación de balance de material se escribe como sigue:

$$PR - F_0 W_p = (1/V)(dW_p/dt) \qquad (22\text{-}33)$$

en donde la velocidad de formación de productos o volumen de producción $PR = f(F_{CSP}, E_C, C_P, W_P, \ldots)$ y el flujo que sale del reactor, $F_0 = f(PR, \ldots)$, dan una ecuación diferencial no lineal. El volumen del reactor es V, y las otras variables se especifican en la tabla 22-13.

Cuando el volumen de producción se controla en forma automática, PR es igual que PR_{SP}, que es el punto de referencia del volumen de producción. En tales condiciones la ecuación de balance de material se convierte en la siguiente expresión

$$PR_{SP} - F_0 W_p = (1/V)(dW_p/dt) \qquad (22\text{-}34)$$

en donde $F_0 = f(PR_{SP}, \ldots)$ y PR_{SP} es una constante. Esta expresión es ahora una ecuación diferencial lineal, que casi siempre se resuelve explícitamente. Esta simplificación de la ecuación dinámica, que describe la concentración del producto en el reactor, simplifica también cualquier ecuación o modelo de control en los niveles superiores de jerarquía del control que comprende información en línea referente a la concentración del producto.

Selección y diseño de los circuitos de control Para seleccionar y diseñar circuitos de control, se deben seguir cuatro pasos esenciales:

1. Establecer las variables de rendimiento o desempeño de la unidad en particular. Por lo común, esto se hace en forma directa. La razón por la cual una unidad se haya construido y funcione de esa manera sirve para estipular las variables de rendimiento.

2. Especificar todas las variables que afectan las variables de rendimiento. Esto incluye tanto a las variables que se pueden manipular como a las que no es factible regular. Aquellas que no se pueden regular son las perturbaciones de proceso. Algunas de estas variables de perturbación se miden directamente, en tanto que otras no se pueden determinar. La lista de todas las variables establece los grados de libertad del sistema.

3. Reducir la cantidad de variables (grados de libertad) definiendo y controlando las variables que sean más fundamentales para las variables de rendimiento de la unidad. Cuanto más se puedan eliminar los efectos de perturbación en las variables de rendimiento, tanto más preciso será el control final.

4. Establecer formas posibles para controlar las variables de rendimiento. El número de maneras posibles para regular las variables de rendimiento es, casi siempre, grande. Este número se reduce normalmente a unos cuantos caminos plausibles, tomando en cuenta las constantes de tiempo, los beneficios del estado estacionario y el intervalo en que se pueden alterar las variables. De entre las formas plausibles, se hace una selección final por medio de la simulación, si el conocimiento del proceso no es suficiente para evaluar por otros medios las selecciones finales.

ıor computadora, en
ɛs para el control de
es la acción de res-
ır computadora en el
ı ingeniería. Las dos
ısde el punto de vista

ıor computadora de
quía del control, pero
utadoras, se obtendrá
2-151, que representa
lo. La porción del sis-
rpora lo que general-
mputadora, desde el
entre la optimización
ión que depende del
ı que se hacen ajustes
el nivel de operación
ıes económicas y téc-
. Los bloques pueden
luales, o bien seccio-

ıtrol utilizados en los
terizan por una can-
racterísticas dinámi-

En el desarrollo de los sistemas de control de procesos, se debe hacer especial hincapié en la definición del resultado final deseado y en la determinación de cuándo se ha logrado tal resultado. El diseño del sistema de control para cualquier unidad debe encaminarse al empleo de las variables de desempeño como puntos de referencia, como se observa en el ejemplo del reactor. Aunque este ejemplo se ocupa de una operación unitaria, el mismo procedimiento se aplicará a cualquier nivel de la jerarquía de control.

Los objetivos básicos de operación de este reactor son generar un producto de una propiedad especificada, un índice de producto y una tasa de producción, y una productividad de catalizador no inferior a un valor estipulado. Estos objetivos constituyen la razón de construcción y operación del reactor, de donde los puntos de referencia de control de la computadora deben ser la tasa de producción, la propiedad del producto y el índice de producto, ya que éstas son las variables de rendimiento. El control deseado se logrará sólo cuando los grados de libertad del reactor sean cero con respecto a estos puntos de referencia, sujeto a la productividad restringida del catalizador y a cualquier otro tipo de limitaciones operacionales que puedan existir. Si hay varios sistemas de control posibles, el que se seleccione debe basarse normalmente en la calidad de control de la variable de rendimiento, como primera consideración, y en cualquier optimización local del proceso que pueda asegurarse, como segunda consideración.

Configuración operación-unitaria-operador-computador En el control por computadora de una operación unitaria, el controlador de computadora debe contener las ecuaciones que relacionan las entradas de medición y la salida deseada, ya sea que dicha salida sea una posición de válvula o un punto de referencia de controlador tradicional. Estas expresiones se denominan a veces ecuaciones de control o modelo del proceso. Dichas ecuaciones pueden ser simple causa y efecto, ecuaciones algebraicas simultáneas, ecuaciones diferenciales simultáneas o simulaciones complejas del proceso que se está controlando.

Si el proceso se entiende perfectamente y se dispone de datos cuantitativos, las ecuaciones de control se escriben explícitamente o se puede construir un modelo matemático que represente exactamente a dicho proceso. Estas ecuaciones o modelos incorporadas al controlador de computadora forman, entonces, la base sobre la cual se genera la señal de control partiendo de las señales de medición.

En aquellos casos en que el proceso es demasiado complejo o no se entiende con la amplitud suficiente para escribir ecuaciones explícitas o construir modelos explícitos, se emplean expresiones empíricas. Cuando se utilizan ecuaciones o modelos empíricos, es probable que se tengan dificultades para evaluar con precisión los parámetros de la ecuación o del modelo, o bien, las ecuaciones o los modelos son difíciles de ejecutar por medio del equipo de computación disponible para intervalos amplios de condiciones de operación.

Se requiere cierto grado de retroalimentación a partir de las variables de rendimiento al mecanismo de control, debido a las relaciones empíricas inexactas, a la falta de exactitud en las mediciones en línea del proceso y en su conversión a entradas compatibles con la computadora, inexactitudes en las respuestas del proceso a las señales de control, la presencia de variables no controladas y las discrepancias acumulativas en los procedimientos de cálculo.

Se tiene un ejemplo cuando el operador debe observar las calidades del material de alimentación y los productos por medio de pruebas de laboratorio u otros medios que no se automatizan con facilidad para alimentarse directamente al controlador de computadora. Partiendo de estas observaciones, el operador hace ajustes menores en el modelo del proceso o las ecuaciones de control, o bien, los efectúa sobre una base por horas o por turnos. Estos ajustes menores consisten, casi siempre, en la modificación del valor de una constante o la restauración del valor de un punto de ajuste de un controlador computarizado.

Una de las consecuencias de aceptar esta premisa de diseño es que el diseñador de sistema utilizará la disponibilidad continua aparente de acción del operador como sustituto para adquirir los suficientes conocimientos sobre el proceso, con objeto de formular modelos o ecuaciones de control adecuadas. Esto genera un proceso menos eficaz.

Un método para diseñar sistemas de control por computadora consiste en utilizar un sistema de control excesivamente simplificado que requiere una considerable atención del operador y acción con el equipo, para una aplicación proyectada hacia el futuro. Lo que se espera es acumular gradualmente el suficiente conocimiento del proceso para ir desarrollando el sistema de control automático. Esto puede conducir a obligaciones de mano de obra futuras de tamaño no controlable, fallas para alcanzar el objetivo de un control adecuado económicamente justificable y el empleo ineficaz de la computadora. Esta situación se torna particularmente importante cuando tiene por objeto poner en práctica un control de computadora desde las operaciones unitarias hasta el nivel de planta.

Otra condición ocurre cuando toda la información de control de operación se recoge automáticamente por medio del controlador de computadora, a una frecuencia que se considera adecuada para el control automático, excepto, póngase por caso, para una variable de rendimiento. Esta variable de rendimiento queda disponible en forma automática, aunque con cierto retraso. En tal caso, la variable de rendimiento se calcula basándose en los datos de proceso automáticamente disponibles, y la acción de control se toma basándose en este valor calculado. Cuando se cuenta con el valor de la variable automáticamente determinado, se compara con el valor calculado empleado, y se ejecuta cualquier ajuste de modelo o ecuación necesario para igualar el valor calculado con el medido. Por ejemplo, en la figura 22-191, la dinámica de proceso es tal que éste puede salirse del intervalo de operación especificado antes de que el cambio de concentración del reactivo pueda medirse por medio de un cromatógrafo de proceso. La concentración de reactivo esencialmente instantánea, calculada por medio de un balance dinámico de material en torno al reactor, sirve para controlar el flujo de reactivo al reactor. Los ajustes computacionales correspondientes se realizan de manera automática para hacer que el valor calculado coincida con el valor medido, cuando se dispone de éste unos minutos más tarde.

En el sistema de control por computadora totalmente automatizado para operaciones unitarias, toda la información que se requiere normalmente queda a la disposición de la computadora en forma automática, sobre una base de tiempo que es adecuada para el control. El operador penetra en el circuito de control sólo en raras ocasiones para modificar el parámetro de control basándose en las observaciones que hace del rendimiento del proceso, tomando en cuenta información externa al proceso, como, por ejemplo, un cambio en los objetivos del procesamiento y un procedimiento de mantenimiento, o bien, la corrección de una situación operacional que el controlador de computadora es incapaz de manejar. Por ejemplo, en el sistema de control del fraccionador ilustrado en la figura 22-175, el operador observa la calidad del destilado producido mediante un analizador en línea o a través de informes de laboratorio. Partiendo de esta información el operador realiza ajustes menores poco frecuentes de algún parámetro computacional en la computadora de predicción, por ejemplo, una constante de la ecuación de balance de material.

Optimización de las operaciones unitarias La optimización de una operación unitaria de proceso continuo es una optimización de tipo local, que casi siempre sirve para generar el producto requerido o la calidad especificada a un costo mínimo. Por ejemplo, la operación de una columna simple de destilación se optimiza cuando se logran productos de especificación a una velocidad mínima de ebullición, es decir, con un insumo mínimo de calor. Véase también la figura 22-188 y la explicación correspondiente, en la subsección "Maximización del rendimiento en operaciones unitarias continuas."

Cuando una operación unitaria es el cuello de botella del proceso, mantener dicha unidad cargada es la responsabilidad de la computado-

ra al nivel de pro
computadora para
alimentación o ac
a otra restricción
optimización de l
producto a una eb
de alimentación d

Además de la
ciones óptimas d
cos en línea par
casi óptimas, pa
procedimiento c
de un modo peri
de operación, re
do un nuevo val
optimizar. Si se
dimiento obteni
el proceso se de
o las restriccion
nes óptimas adq
probar un mode
chas pruebas a
para la operació

Cualquiera de
do automático o e
es decir, el modo
tica, pero el oper
tomen realmente

Estas técnica
lles quedan fuer
mico. Se ha info
control sencillo
buscan el valor
tadora digital e
y en las publica
cos de este géne
den ampliar a o
variables manip
para obtener un
que se está cons

Control adap
normales incluid
mo para optimiz
aplicaciones de
gradualmente a
las condiciones
rador. Por lo con
ciones normales

Usualmente,
carga tratada
constantes de
res se incluye
tantes de sinto
tomática, par
funcionamien
constantes de
explícita de u
velocidad de
la memoria de
función de la
con el valor d

Ejemplos de
dora En la subs
ejemplos adicio
todo, se hace re
figuras 22-167

ɔs suficientes cono-
modelos o ecuacio-
menos eficaz.
computadora con-
te simplificado que
acción con el equi-
Lo que se espera es
del proceso para ir
to puede conducir a
controlable, fallas
onómicamente jus-
sta situación se tor-
ojeto poner en prác-
ones unitarias hasta

nación de control
medio del contro-
considera adecua-
ase por caso, para
endimiento queda
cierto retraso. En
basándose en los
es, y la acción de
ulado. Cuando se
ente determinado,
y se ejecuta cual-
ra igualar el valor
figura 22-191, la
se del intervalo de
de concentración
cromatógrafo de
almente instantá-
ico de material en
e reactivo al reac-
ientes se realizan
alculado coincida
éste unos minutos

almente automati-
ción que se requiere
putadora en forma
ecuada para el con-
l sólo en raras oca-
asándose en las ob-
oceso, tomando en
r ejemplo, un cam-
edimiento de man-
ón operacional que
nejar. Por ejemplo,
do en la figura 22-
producido median-
le laboratorio. Par-
ustes menores poco
la computadora de
ación de balance de

ias La optimiza-
ntinuo es una opti-
e para generar el
un costo mínimo.
iple de destilación
pecificación a una
n insumo mínimo
xplicación corres-
el rendimiento en

botella del proceso,
ad de la computado-

ra al nivel de procesos unitarios. En el caso de fraccionamiento, la computadora para el proceso unitario continuaría incrementando la alimentación o aceptaría toda la alimentación disponible hasta llegar a otra restricción operacional. Esto no alteraría de ninguna manera la optimización de la columna individual, ya que la especificación de producto a una ebullición mínima es óptima, sea cual sea la velocidad de alimentación de la columna.

Además de la formulación matemática explícita de las condiciones óptimas de operación, se tienen dos procedimientos básicos en línea para obtener condiciones de operación óptimas, o casi óptimas, para operaciones unitarias continuas. El primer procedimiento consiste en verificar automáticamente el proceso de un modo periódico, desplazándolo en forma leve de su punto de operación, regulando las variables controladas y determinando un nuevo valor de la variable de rendimiento que se desea optimizar. Si se lleva un registro del valor de la variable de rendimiento obtenida y se compara este valor con otro subsecuente, el proceso se desplazará hacia la condición óptima de operación o las restricciones de funcionamiento que constituyan condiciones óptimas adquiribles. El segundo procedimiento consiste en probar un modelo del proceso y trasladar los resultados de dichas pruebas a las condiciones de operación correspondientes para la operación unitaria.

Cualquiera de estos dos procedimientos se pueden aplicar en el modo automático o en el modo manual. En la ejecución usual del proceso, es decir, el modo manual, la verificación se realiza en forma automática, pero el operador decide en lo que respecta a las acciones que se tomen realmente en el proceso.

Estas técnicas son muy especializadas y, como tales, sus detalles quedan fuera del alcance de este *Manual del Ingeniero químico*. Se ha informado de la existencia de varios dispositivos de control sencillos de tipo automático, de una sola variable y que buscan el valor máximo. Sin embargo, el controlador de computadora digital es el instrumento más útil de este tipo de control, y en las publicaciones especializadas aparecen ejemplos prácticos de este género de aplicaciones. Estos procedimientos se pueden ampliar a otros niveles de la jerarquía de control, y ciertas variables manipuladas se pueden optimizar en forma simultánea para obtener un valor casi óptimo de la variable de rendimiento que se está considerando.

Control adaptable El control por computadora con controladores normales incluidos en el sistema de computadora ofrece un mecanismo para optimizar en forma parcial el ajuste del controlador. En las aplicaciones de controlador normal, la cantidad de ajuste se reduce gradualmente a una condición que representa respuestas estables en las condiciones operacionales más adversas que pueda tolerar el operador. Por lo común, esto representa respuestas muy escasas en condiciones normales de operación.

Usualmente, el ajuste óptimo del controlador varía con la carga tratada del proceso, ya que las ganancias de éste y las constantes de tiempo sufren alteraciones. Si los controladores se incluyen en el controlador de la computadora, las constantes de sintonización de este último cambian de manera automática, para corresponder a las condiciones actuales de funcionamiento del proceso. Esto se maneja haciendo que las constantes de sintonización del controlador sean una función explícita de una variable de proceso, como, por ejemplo, la velocidad de flujo. Otra forma consiste en tabular, dentro de la memoria de la computadora, los ajustes del controlador en función de la variable de proceso y comparar dichos ajustes con el valor de la variable de proceso.

Ejemplos de control de las operaciones unitarias por computadora En la subsección "Control de operaciones unitarias" se presentan ejemplos adicionales que se ocupan de las operaciones unitarias; sobre todo, se hace referencia especial a la explicación relacionada con las figuras 22-167 a la 22-169.

CONTROL DE LOS PROCESOS UNITARIOS POR COMPUTADORA

El proceso unitario es el siguiente nivel superior dentro de la jerarquía del control. Para los fines de control, casi siempre se trata de un conjunto de operaciones unitarias cuyos funcionamientos individuales se deben coordinar para satisfacer un conglomerado específico de objetivos. Los controladores normales proporcionan muy poco control automático al nivel de procesos unitarios. La operación de estos procesos sin el control de computadora consiste en el análisis de los datos diarios de operación, o datos promediados en un tiempo que se considere como periodo operacional, tarea que queda a cargo del personal de supervisión. Ellos deciden la forma como se deben ejecutar las diversas operaciones unitarias del proceso unitario, durante el siguiente periodo operacional. A continuación, estas decisiones se transmiten al operador de las operaciones unitarias. A su vez, esta persona determina qué puntos de referencia se utilizarán en los controladores normales individuales o en los controladores de computadora de operaciones unitarias, como ya se vio bajo el título de "Control de las operaciones unitarias por computadora". En muchas plantas, estos dos niveles de jerarquía de control pueden estar dirigidos por la misma persona; de manera que este procedimiento quizá no sea muy evidente.

Cuando se tiene un control normal y un control por computadora limitado a operaciones unitarias, los objetivos del rendimiento de estas últimas tienden a hacerse fijos en el periodo operacional estándar de la planta, lo cual casi siempre representa un día por lo menos. Cuando se tiene control por computadora del nivel de procesos unitarios, algunas variables de rendimiento de las operaciones unitarias se hacen funciones básicamente y minuto a minuto de las variables de rendimiento del proceso unitario. Los principios del control de procesos unitarios son, por lo común, una ampliación directa de los que se relacionan con las operaciones unitarias. No obstante, el sistema de control de un proceso unitario es, por lo común, un paso posterior separado de la operación de las válvulas, y las señales de control de entrada de retroalimentación o alimentación directa son, con frecuencia, variables de rendimiento calculados más que mediciones directas del proceso. Además, el cálculo de las salidas de control de un proceso unitario, que son puntos de referencia, se encuentra usualmente en la modalidad de estado estacionario más que dinámico.

Las unidades de procesamiento que se pueden designar como procesos unitarios se caracterizan por una complejidad muy variada. Como se mencionó antes, los procesos unitarios más sencillos se manejan por extensión de las técnicas de control de las operaciones unitarias por computadora. Los procesos unitarios más complejos se pueden manejar aplicando las técnicas que se explican bajo el título "Control de plantas de proceso por computadora".

Sistema de fraccionamiento En la figura 22-152 aparece el ejemplo de un controlador con computadora en que se combinan procesos unitarios y operaciones unitarias, en relación con un complejo de fraccionamiento. Sólo se indican las salidas del controlador-computador hacia el proceso. Los detalles adicionales que se relacionan con los requisitos de medición del proceso y el control de los fraccionadores individuales se pueden ver dentro del texto de las subsecciones "Control de columnas de destilación" y "Maximización del rendimiento en operaciones unitarias continuas", que se refieren a las figuras 22-175 y 22-188. En la figura 22-168 se muestra un control típico de entalpía, como se emplea en las alimentaciones de columna.

Sin el controlador de computadora para un proceso unitario, el supervisor de planta se enfrentaría diariamente a la tarea de determinar las especificaciones del producto de cada columna, así como decidir la división de alimentación entre las columnas en paralelo. Esto representa un total de 15 variables, dos especificaciones de producto por columna y tres distribuciones de alimentación. Todas estas decisiones se basarían en la velocidad de alimentación anticipada y la composición de alimentación que se debe suministrar al complejo, así como

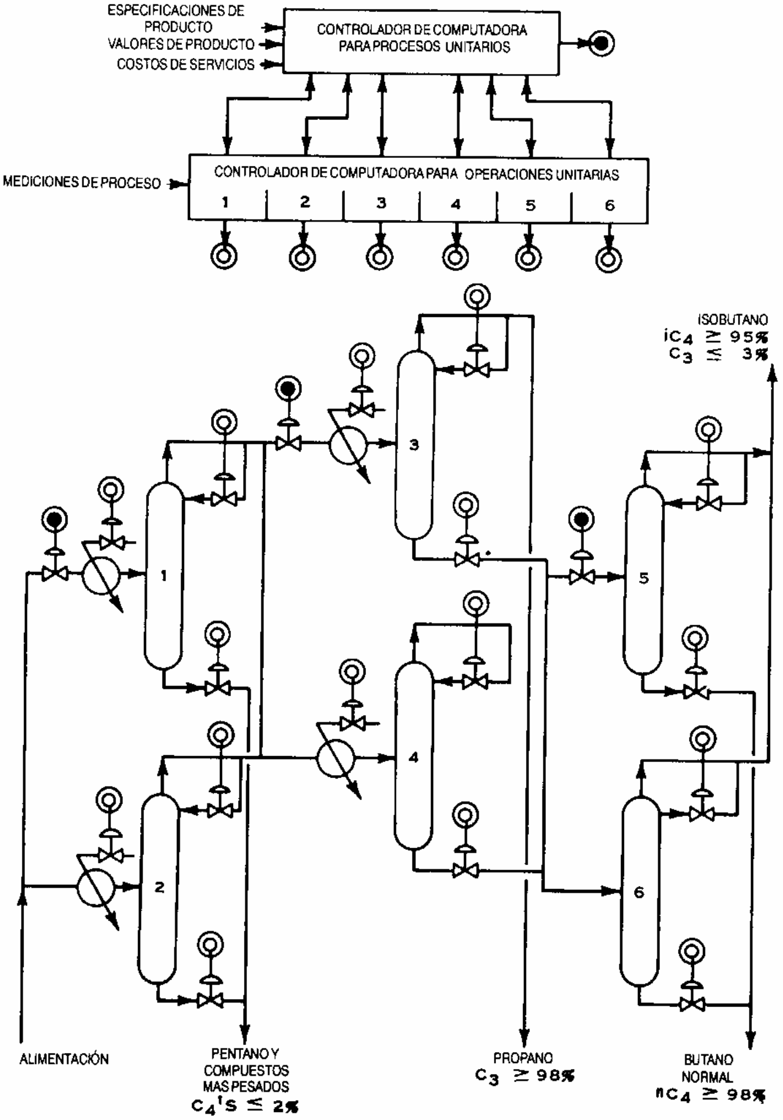


FIG. 22-152 Control por computadora de un proceso unitario correspondiente a un sistema de fraccionamiento, en el cual se muestra la división de las acciones de control normal entre los controladores por computadora para los procesos unitarios y para las operaciones unitarias.

operaciones anticipadas de los procesos unitarios corriente abajo. Una vez que se toman todas estas decisiones, estarían vigentes durante el resto del día y a lo largo del período operacional, incluso aunque las variaciones en la velocidad y la composición de la alimentación alteraran las características de la operación óptima.

La instalación de la computadora para un proceso unitario proporciona la optimización de las especificaciones del producto de columnas individuales, así como las velocidades de alimentación suministrada a la columna. Las especificaciones del producto final del complejo se le estipularían a la computadora desde un nivel de planta.

En la figura 22-152
pureza mínima del
producto, es decir,
Si las corrientes
rrientes terminales
dimiento monetari
todas estas corrien
que se utiliza una

en donde C_j = cost
P_s = scu
V_i = val
Y_i = ren
A veces es muy di
la planta. Sin emb
siempre el princip
lores reales. Esos
más que cantidad
En este ejempl
los reajusta de ti
del mercado y de
beneficio o rendi
producto de los 1
especificación d

En la figura 22-152 se da una lista de las especificaciones típicas como pureza mínima del producto y/o máximo de impureza permisible en el producto, es decir, las restricciones de desigualdad.

Si las corrientes de producto del complejo fraccionador son las corrientes terminales de la planta, se podría utilizar una ecuación de rendimiento monetario de operación para la optimización. En general, no todas estas corrientes son corrientes terminales de planta, de manera que se utiliza una ecuación de seudorrendimiento:

$$P_S = \sum_j \left(\sum_i V_i Y_i \right)_j - C_j \qquad (22\text{-}35)$$

en donde C_j = costo de utilidades en la columna j

P_s = seudorrendimiento

V_i = valor del componente i

Y_i = rendimiento del componente i

A veces es muy difícil determinar el valor de una corriente interna de la planta. Sin embargo, puesto que el beneficio monetario debe ser casi siempre el principal criterio de optimización, se deben determinar valores reales. Esos valores pueden ser funciones de diversas variables más que cantidades fijas.

En este ejemplo, el personal de la planta especifica los valores y los reajusta de tiempo en tiempo conforme varían las condiciones del mercado y de procesamiento. La ecuación (22-35) relaciona el beneficio o rendimiento monetario con el reflujo interno, el flujo del producto de los fondos, costos de calentamiento y enfriamiento y especificación del producto de cada columna, tanto como la división de alimentación entre las columnas en paralelo, la velocidad de dosificación al complejo y la composición de la alimentación. El beneficio monetario se maximiza por medio de un procedimiento computarizado de investigación sujeto a las restricciones de especificación de pureza del producto, la disponibilidad de la alimentación, la capacidad de utilizar o vender los productos y las restricciones de operabilidad.

Una vez que se instala el controlador de computadora para el proceso unitario, la supervisión de la planta sólo se debe preocupar regularmente por las cuatro especificaciones que se estipulan en la figura 22-152, el procesamiento corriente abajo anticipado u otro uso, y la velocidad de alimentación disponible para procesos corriente arriba. La velocidad y la composición de la alimentación se han eliminado como grados de libertad en lo que respecta al complejo, sujetos a las restricciones impuestas por la máxima carga tratada. Así pues, los grados de libertad se han reducido a 13, es decir, 11 dentro de la unidad y 2 del proceso anterior.

Proceso de polimerización Como segundo ejemplo del control por computadora de un proceso unitario, véase el proceso de polimerización, que consta de dos series o trenes de producción. Cada tren consiste en un número determinado de reactores en paralelo, seguidos por un equipo de separación y purificación de la alimentación para reciclaje. Los reactores son del tipo que se ilustra en la figura 22-176. Ambos trenes se pueden utilizar para producir simultáneamente dos polímeros de propiedades distintas, o bien, los dos polímeros se pueden combinar para producir un tercer polímero, como se ilustra en la figura 22-153. Para los fines de esta ilustración,

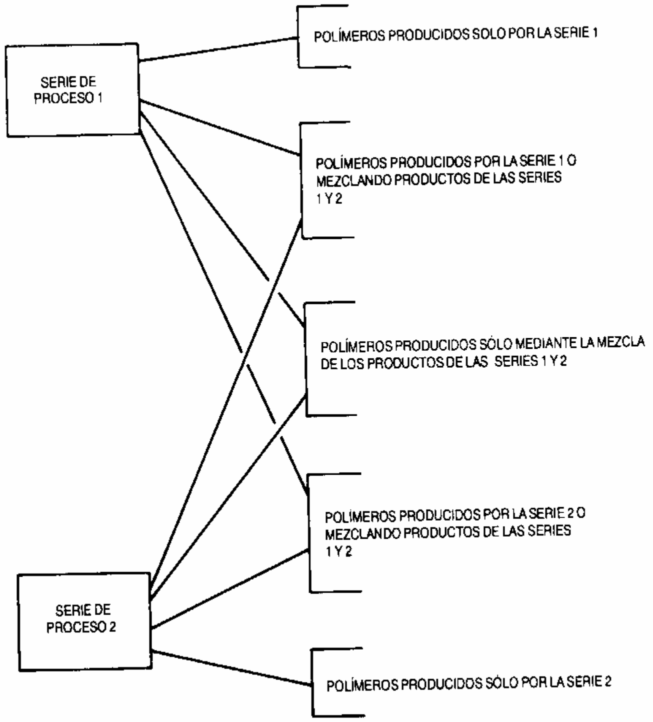


FIG. 22-153 Productos disponibles de un proceso unitario para la polimerización en dos series, o trenes.

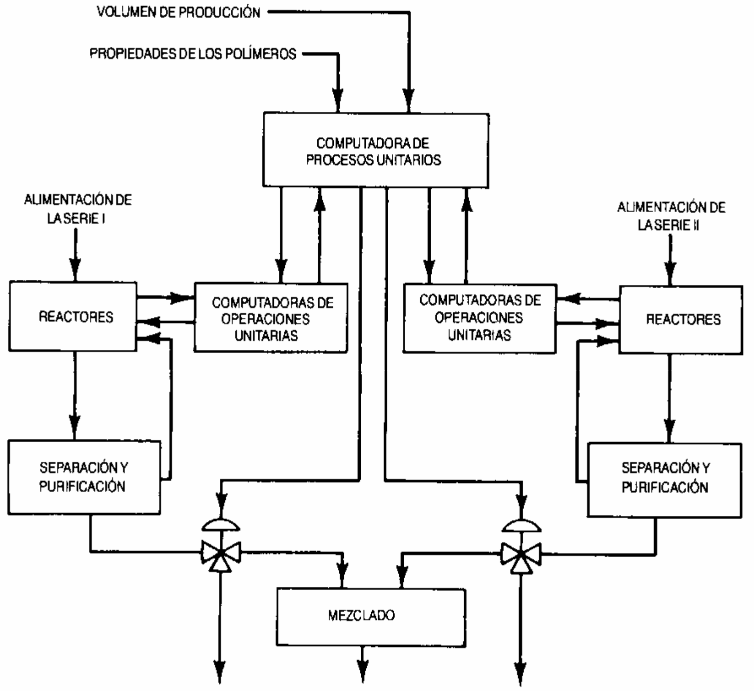


FIG. 22-154 Diagrama esquemático simplificado que ilustra la relación entre la computadora de control del proceso unitario y las computadoras que controlan la operación unitaria (sólo los reactores), y el proceso de polimerización de productos múltiples.

no se tomarán en cuenta los detalles concernientes a la preparación de la alimentación, el proceso de separación y la purificación de la alimentación para reciclaje.

Con este proceso se pueden producir polímeros con una amplia variedad de propiedades. El espectro de polímeros que es factible producir consiste en aquellos que se elaboran en una sola serie: aquellos que se producen sólo mezclando polímeros de dos trenes y aquellos que se elaboran ya sea mediante una de las series o mezclando los productos de ambas.

Se presenta un problema de optimización, ya que el costo para producir una cantidad determinada de un polímero en particular no es el mismo para ambos trenes, la capacidad de producción de los trenes varía con la clase de polímero que se esté elaborando y las propiedades de éstos no se suman linealmente al mezclarse. El propósito de utilizar la computadora para el proceso unitario es satisfacer la demanda de polímero con el costo mínimo de producción posible. La computadora para el proceso unitario determina tanto la velocidad de producción como el tipo de polímero para cada reactor, como se observa en la figura 22-154.

CONTROL DE PLANTAS DE PROCESO POR COMPUTADORA

La planta, o fábrica, es el siguiente nivel dentro de la jerarquía de control. La planta consiste por lo común en el conjunto de todos los procesos unitarios en una ubicación, cuya operación se debe coordinar para satisfacer un conjunto específico de objetivos. A este nivel, los controladores normales no proporcionan prácticamente ningún control automático.

Sin el control por computadora en los niveles de planta o de procesos unitarios, el periodo de operación de planta en "estado estacionario" tiende a prolongarse durante varios días. Dicho de otra manera, en general, no se le dan diariamente al operador o al supervisor de procesos unitarios los ajustes de carga tratada o metas de especificación de producto para procesos unitarios individuales. Si alguna perturbación afecta un proceso unitario que, a su vez, afecta un segundo proceso unitario, sobre todo en lo que respecta a la calidad del producto, el proceso de la segunda unidad se reajusta de manera local, con el fin de reducir al mínimo el producto que queda fuera de las especificaciones, mientras no se obtengan instrucciones distintas.

Con el control por computadora a nivel de planta, este tipo de perturbación generaría rápidamente un ajuste automático en cualquier proceso unitario afectado por la calidad o la carga tratada, con objeto de conservar las variables de rendimiento. Si la perturbación persistiera, la distribución de la carga tratada del producto de planta se alteraría en el siguiente ciclo de computación del control a nivel de planta para, póngase por caso, reducir al mínimo los costos de operación de la misma.

Desarrollo del proyecto de control Una de las características de una planta de procesamiento continuo de gran tamaño es que representa una red de unidades interactuantes, como se ilustra en la figura 22-155. Normalmente, cuando se desea limitar el proyecto de control por computadora a una parte de la planta, ésta se puede subdividir en varios procesos unitarios que se puedan tratar en forma esencialmente independiente, con el fin de lograr el control y la optimización en línea. La subdivisión ayuda también a organizar los conceptos de control y optimización que se utilizarán si toda la planta se va a poner bajo control por computadora, ya sea con una sola computadora o con un grupo

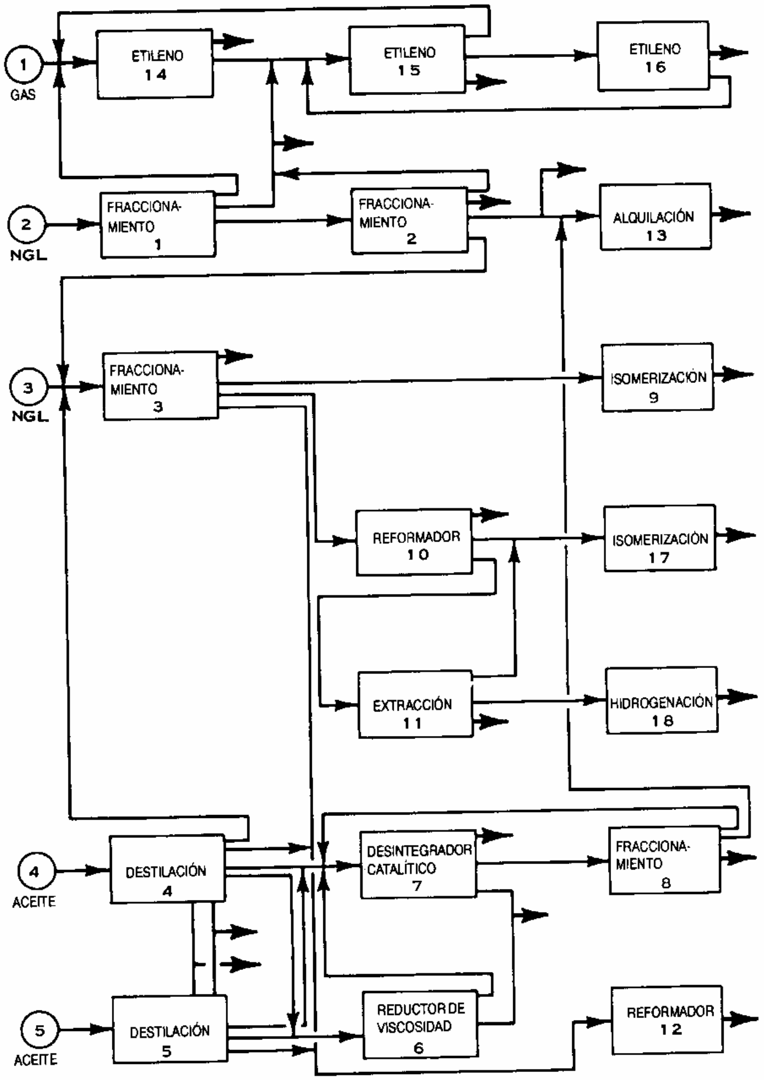


FIG. 22-155 Diagrama de flujo abreviado de un complejo o una planta petroquímica de refinería. ①, ②, ③, ④, ⑤ y → indican las corrientes, de alimentación y productos, respectivamente.

de computadoras para procesos unitarios. También contribuye a identificar la entrecara entre procesos unitarios no interactuantes, y las interacciones que causan problemas de entrecara entre procesos unitarios interactuantes.

Se debe dar especial atención a las unidades interactuantes, con el propósito de formular sistemas de control que tomen en cuenta las interacciones de ellas. Las otras unidades se pueden tratar de manera independiente unas de otras, excepto en el sentido de que una unidad puede alimentar o recibir alimentación de otras.

Otra estrategia que permite establecer el control de computadora de una planta completa consiste en principiar con los procesos unitarios o incluso operaciones unitarias, e irlos sumando uno por uno al sistema de control de la planta. Si el control en un proceso unitario es bueno, entonces, la cantidad de información requerida en la entrecara de la

unidad de procesos que se conecta con las unidades interactuales o proviene de ellas, se reduce a un mínimo, y el trabajo de agregar el siguiente nivel de jerarquía también es mínimo. En otras palabras, si el grado de libertad de la unidad de proceso se reduce al nivel práctico más bajo por medio del sistema de control, el número de entradas al controlador de planta se habrá reducido y se cambiará el carácter a entradas que normalmente representan variables de rendimiento de un proceso unitario.

En lo que respecta a la decisión de qué unidades se deben controlar, hay otras consideraciones generadas por las unidades en que: la carga volumétrica tratada y por lo tanto monetaria, es grande; el diferencial de precio entre la alimentación y el producto es grande; las unidades son cuellos de botella del proceso; la unidad es inestable o difícil de controlar por medios normales, y la unidad genera productos finales de proceso.

Simplificación de un sistema de control para un complejo industrial Como ejemplo de la simplificación o subdivisión de un sistema de gran tamaño, véase un complejo usual de refinería y petroquímica (Fig. 22-155). Se trata de un diagrama de flujo abreviado en el cual se muestran los procesos unitarios como los identifica la administración de la planta. La planta se alimenta con una corriente de gas, líquidos de gas natural (NGL), provenientes de dos fuentes, y petróleo crudo, proveniente tambien de dos fuentes. La variedad de productos se distribuye en tuberías, almacenamientos e instalaciones de mezclado.

Si la figura 22-155 se interpreta por medio de una gráfica de flujo de señales, combinando las unidades enlazadas entre sí por medio de las principales corrientes de reciclaje y omitiendo las salidas de producto, se obtiene el diagrama de la figura 22-156. Aquí, algunos productos finales representan hasta seis etapas de proceso de las alimentaciones de planta. También se observa una gran variedad de tamaños y grados de complejidad de las unidades que aparecen en este diagrama.

Si se hace una simplificación subsecuente combinando funciones similares y fuentes múltiples con otras unidades, se obtiene el diagrama de la figura 22-157. Esto reduce todo el complejo a cuatro etapas de proceso o menos, desde las alimentaciones hasta los productos finales. En este diagrama se observa una variación mayor aún en tamaño y complejidad de las unidades.

La planta ilustrada en la figura 22-155 es grande, y el control por computadora, complejo. Del mismo modo, algunos procesos unitarios son grandes y pueden representar un proceso demasiado amplio para que se resuelva de una sola vez, en vista de los recursos disponibles

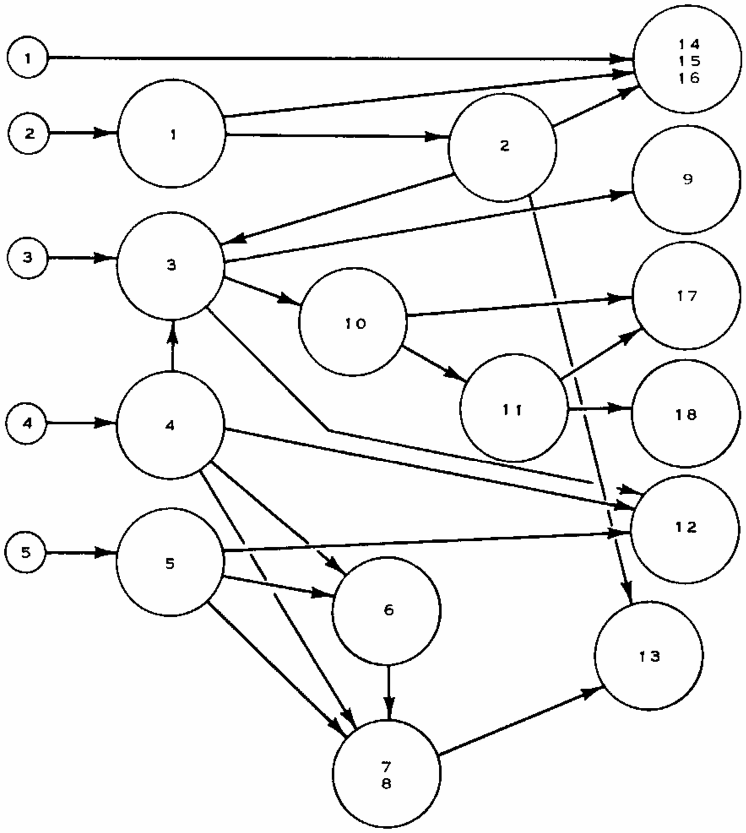


FIG. 22-156 Gráfica del flujo de señales de una planta de refinería y petroquímica, en donde se combinan las unidades que interactúan con las corrientes de reciclaje.

FIG
corr

para la organizac
computadora.

Los grandes prc
cepto de proceso u
14, 15 y 16 puede
procesos unitarios
principales. Las t
dos corrientes de
las dos primeras u
trol, cuando se co
limitados se podi
último caso, la de
puede ser como s
de recuperación
de gas reformado

Conforme los
gregan en unidad
entrelazan unida
establecer los ob
valor monetario
terminar, y en oc
especiales en el

La técnica de si
booleana. Partien
la figura 22-155,
proceso por medi

crudo, proveniente
se distribuye en tu-
ado.
ına gráfica de flujo
entre sí por medio
endo las salidas de
156. Aquí, algunos
proceso de las ali-
a gran variedad de
es que aparecen en

ıbinando funciones
e obtiene el diagra-
lejo a cuatro etapas
ta los productos fi-
ayor aún en tamaño

de, y el control por
s procesos unitarios
asiado amplio para
cursos disponibles

ac-

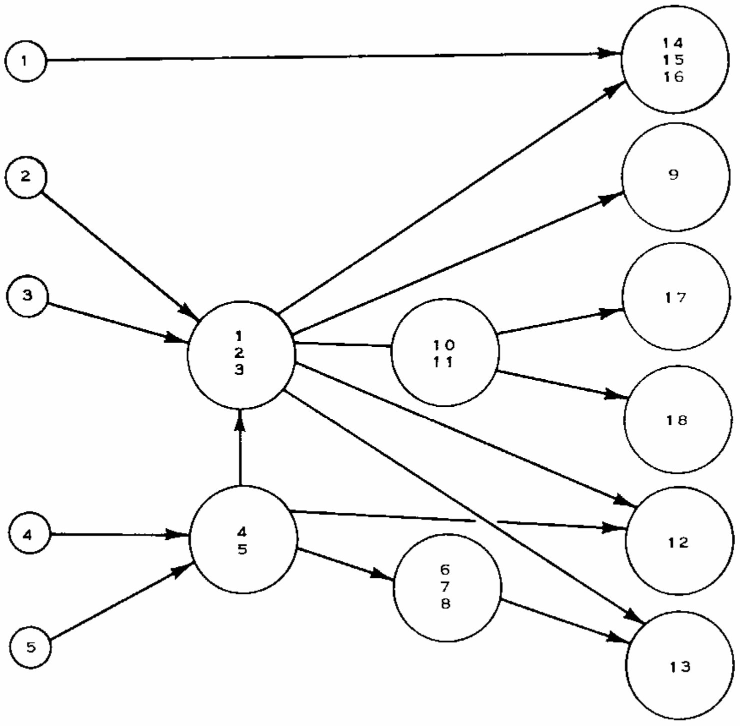


FIG. 22-157 Gráfica del flujo de señales de la figura 22-156 en donde se combinan las unidades de naturaleza similar o que poseen corrientes de alimentación comunes.

para la organización, teniendo en mente un control de proceso por computadora.

Los grandes procesos unitarios se consideran como plantas y el concepto de proceso unitario se reduce a escala. Por ejemplo, las unidades 14, 15 y 16 pueden considerarse como una planta que consta de tres procesos unitarios más pequeños con tres corrientes de alimentación principales. Las tres corrientes son la alimentación exterior de gas y dos corrientes de alimentación de la unidad uno. Incluso en este caso, las dos primeras unidades son grandes, desde el punto de vista de control, cuando se comparan con la tercera, y para situaciones de recursos limitados se podrían considerar como plantas por separado. En este último caso, la designación del proceso unitario en la planta de etileno puede ser como sigue: los hornos de pirólisis en paralelo y la caldera de recuperación como un proceso unitario, el sistema de compresión de gas reformado como otro y el fraccionamiento como otro más.

Conforme los procesos unitarios o las plantas de gran tamaño se disgregan en unidades más pequeñas, las corrientes de reciclaje y las que entrelazan unidades menores adquieren una mayor importancia para establecer los objetivos individuales del procesamiento de unidad. El valor monetario de algunas de estas corrientes es a veces difícil de determinar, y en ocasiones imponen restricciones económicas y técnicas especiales en el proceso unitario.

La técnica de simplificación se formaliza un poco utilizando el álgebra booleana. Partiendo de un diagrama de proceso como el que se ilustra en la figura 22-155, es factible construir una matriz booleana y analizar el proceso por medio de operaciones matemáticas en dicha matriz.

Optimización del proceso Un proceso de n etapas se presta para una optimización del tipo de programación dinámica, con el fin de satisfacer los objetivos de planta especificados para la carga tratada, la distribución de producto y las cualidades de producto al costo mínimo de producción. En un proceso de tres etapas, cuando se empieza con el proceso unitario terminal o de la tercera etapa, ésta queda optimizada. Si se combina la tercera etapa optimizada con la unidad de la segunda etapa, la combinación se optimiza manteniendo la tercera etapa en su condición óptima. Siguiendo esta secuencia, la segunda y tercera etapas combinadas ya optimizadas se combinan con la primera y el sistema completo es optimizado en términos de establecer los objetivos de rendimiento del proceso unitario para satisfacer los objetivos de la planta. Los reajustes necesarios dentro de los procesos unitarios para satisfacer los objetivos y las restricciones del rendimiento del proceso unitario, quedan bajo la responsabilidad del controlador de computadora al nivel del proceso unitario.

Determinar los objetivos de control de un proceso unitario de n etapas que maximice el ingreso o minimice los costos, implica por lo común otras técnicas de optimización, además de la programación dinámica. Por ejemplo, si el proceso unitario es una operación tipo lotes, se pueden aplicar procedimientos de cálculo de variación. También se pueden encontrar diferencias importantes en el tipo de información disponible cuando se aplica un control por computadora a una planta ya establecida, una planta nueva que sea similar a aquella para la cual se tiene una experiencia de operación, una planta nueva basada en una operación extensa de una planta piloto, o una planta nueva basada en muy poca o ninguna experiencia de operación.

La estrategia del control por computadora de una planta se debe basar en objetivos reales del rendimiento o desempeño de la misma, que se puedan emplear para determinar los objetivos de los procesos unitarios individuales que constituyen dicha planta. La ejecución de esta estrategia en la porción a nivel planta del sistema de computadora produce, entonces, los puntos de referencia del controlador de computadora a nivel de procesos unitarios.

Ejemplo de una planta de etileno Las plantas de etileno constituyen candidatos valiosos para implantar un control por computadora, debido a su tamaño y complejidad, y a la frecuencia con que se presentan perturbaciones que afectan el funcionamiento de la misma. Una planta usual de etileno alimentada con nafta consta de varios hornos de pirólisis con alimentación en paralelo, y unos cuantos hornos de reciclaje seguidos en orden por una caldera de recuperación, un fraccionador principal, un compresor de gas reformado y una serie de fraccionadores de producto y reactores de purificación.

Las variables controladas de cada horno son: velocidad de alimentación de hidrocarburos, velocidad de alimentación de vapor, temperatura de salida del serpentín y presión del serpentín. La temperatura de salida del serpentín de horno se controla regulando la velocidad de combustible suministrado a cada horno. La presión de salida del serpentín, que es común a todos los hornos, se controla por medio de una presión de succión del compresor de gas reformado. Para N hornos, las variables regulables por computadora suman $3N + 1$ grados de libertad.

La respuesta principal del proceso a estas variables controladas es la distribución de concentración de los componentes del efluente del horno, que varían desde hidrógeno y metano hasta gasolina y combustóleo. El modelo del proceso unitario del horno expresa los rendimientos individuales como una función de las cuatro variables de control del horno. Las perturbaciones del horno y la caldera de recuperación incluyen la composición de la alimentación, la calidad del vapor suministrado al horno, la distribución de coque dentro del horno y los tubos de la caldera de recuperación que afectan la presión del serpentín, y la transmisión de calor a la temperatura ambiente, y la disponibilidad de agua de enfriamiento.

Hay ciertas restricciones físicas y de seguridad impuestas en la planta, más allá de las cuales es imposible operar. Estas restricciones se dividen en dos grupos: de horno y corriente abajo. Las restricciones impuestas en los hornos son: temperatura máxima de salida del serpentín, velocidades máxima y mínima del vapor, temperatura máxima del refractario, temperatura máxima de salida de la caldera de recuperación, velocidades máxima y mínima de alimentación de hidrocarburo, razón mínima de vapor a alimentación y temperatura máxima del revestimiento del tubo. Las restricciones corriente abajo incluyen máxima potencia disponible para el compresor de gas reformado, flujo máximo de gas a través del compresor y capacidad máxima de refrigeración.

Los criterios para el rendimiento de la planta se formulan tomando en cuenta los rendimientos de los diversos productos, los valores de producto y los mercados de producto para las características de alimentación especificadas.

ECUACIONES Y MODELOS DE CONTROL

La mayor parte de los sistemas de control por computadora emplean alguna clase de modelo o ecuaciones de control. Estos modelos se dividen en categorías que corresponden a cuatro niveles de control computarizado: reemplazamiento de controladores convencionales o regulación, control dinámico por computadora, control por computadora en estado estacionario y control de computadora fuera de línea.

Controladores convencionales computarizados El objetivo de la porción computarizada de un controlador convencional de una a tres modalidades es corregir el error en la variable medida de una manera óptima, ajustando alguna variable de proceso que afecte la variable medida. El ajuste óptimo consiste en obtener el valor deseado en un tiempo mínimo y con un error total también mínimo. Esto lleva a procedimientos de ajuste y ajuste del controlador como los que se vieron bajo el título "Fundamentos de control automático."

El controlador normal contiene un modelo empírico de proceso en el cual se emplea la medición de error para predecir en qué grado se debe ajustar la variable manipulada o regulada para hacer que el error tienda a cero. Puesto que el modelo del controlador es empírico y casi siempre es excesivamente sencillo, depende de la señal de retroalimentación para mantener actualizado el ajuste del proceso. Los procedimientos de sintonización o ajuste desarrollados para este tipo de controladores toman en cuenta esta simplificación. Limitan la respuesta de control a un máximo, que evitará que la respuesta se sobremodule de manera excesiva en relación con el valor deseado de la variable controlada, antes de reajustarse de acuerdo con la señal de retroalimentación.

El modelo del controlador normal es cierta modificación del controlador ideal de tres modos representado por la expresión

$$m = k_c e + \frac{k_c}{T_i}\int e\,dt + k_c T_d \frac{de}{dt}$$

o bien,

$$M = k_c\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)E \qquad (22\text{-}36)$$

Las modificaciones se deben, casi siempre, a limitaciones físicas de la ejecución mecánica o eléctrica de esta forma idealizada. Consúltese también el texto relacionado con la ecuación (22-20).

En un sistema computarizado, el algoritmo del controlador computarizado puede satisfacer la ecuación (22-36) con gran precisión. Contrariamente a lo que sucede con las prácticas mecánicas, los ajustes de k_c, T_i y T_d, no son interactuantes, lo que hace que los procedimientos de sintonización sean un poco más sencillos. Además, se pueden hacer otras modificaciones en el modelo, por ejemplo, la adición de compensación de tiempo muerto, como se indica en la figura 22-55, o también se pueden agregar respuestas extremadamente no lineales. Por ejemplo, en un controlador sólo de tipo proporcional, k_c puede ser una función no lineal del error.

En el caso de controladores computarizados, también es relativamente fácil cambiar el modelo en forma automática en respuesta a las condiciones de la operación de proceso. Por ejemplo, las constantes de ajuste pueden hacerse funciones de alguna variable de proceso, haciendo que el controlador sea de tipo adaptable, manteniendo una sintonía casi óptima en intervalos amplios de una variable de proceso. Por ejemplo, la ecuación (22-36) se puede convertir en la siguiente expresión

$$M = f_c[C(s)]\left[1 + \frac{1}{f_i[C(s)]s} + f_d[C(s)]s\right]E$$

En las instalaciones de computadora digital de controladores normales se encuentran con frecuencia los términos "algoritmo de velocidad" y "algoritmo de posición". Estos términos son designaciones de la forma como la señal de salida del controlador, m se presenta al sistema que activa la válvula. El algoritmo de velocidad indica que el cambio registrado en la señal desde su valor más recientemente presentado, se presenta al sistema que activa la válvula. Si se emplea el algoritmo de posición, entonces, lo que se presenta es más bien la nueva posición en lugar del cambio incremental de la misma.

Los ajustes de sintonía o ajuste para el controlador de computadora digital pueden variar ligeramente de los controladores normales, debido a que los sistemas digitales emplean un muestreo periódico de entrada (es decir, entradas de datos muestreados) en lugar de entradas continuas.

Controladores convencionales computarizados con entrada de múltiples variables En muchas configuraciones de controlador con retroalimentación que utilizan varias mediciones para computar una variable de proceso, la determinación algebraica es una operación instantánea transmitida de manera directa a un controlador normal o a un controlador computarizado como señal de medición de retroalimentación o como punto de referencia. En la figura 22-176 se presenta un ejemplo muy complejo de este tipo de sistema de control, en donde el volumen de producción calculado se alimenta al controlador del volumen de producción en forma de medición de variable de proceso.

En este caso, para
se divide en tres pa
lador computarizad
la compensación de
la tercera el control
Como se ilustra
mentación directa,
siempre, un model
condiciones, el flu
instantáneamente
temperatura de sali
$- T_0$), en donde T_0 e
del proceso y T la t
trolador solamente
En situaciones m
se ilustran en la se
referencia a la figu
ticas dinámicas del
del mismo.
Modelos de esta
jerarquía de control,
trol va en disminuci
riables que son fija
variable se desplaza
conocen como mod
tricciones en estos n
locidades de cambi
ciones pueden indic
ser el resultado de a
factible realizar un
sar de que así lo ind
Los modelos de
lador convencional
de referencia de co
dinámicas comput
velocidad de produ
cionador o la veloc
cribe en la parte co
Los modelos de est
de procesos unitar
encia de las variab
por ejemplo, las e
mentación para ca
en la figura 22-15
erencia de especif
como se observa e
Las ecuaciones
la información del
mación experimen
proceso. Uno de lo
rica para desarrolla
detalles. Por otro la
able que haya relac
a la dificultad de
equipo a escala de
mino medio acepta
las ecuaciones de e
título "Análisis del
les sobre el desarro
Modelos dinám
dinámico son aque
tiempo, o bien, una
variable de proces
mún, ecuaciones d
nos como ecuacio
Una ilustración
sación del tiempo
es el controlador d

mo los que se vieron
o."
pírico de proceso en
ecir en qué grado se
ra hacer que el error
or es empírico y casi
señal de retroalimen-
so. Los procedimien-
tipo de controladores
puesta de control a un
le de manera excesiva
ılada, antes de reajus-

lificación del contro-
resión
de
dt

(22-36)

taciones físicas de la
alizada. Consúltese
20).
controlador compu-
gran precisión. Con-
ínicas, los ajustes de
los procedimientos
nás, se pueden hacer
adición de compen-
ura 22-55, o también
lineales. Por ejem-
puede ser una fun-

bién es relativamente
puesta a las condicio-
stantes de ajuste pue-
eso, haciendo que el
sintonía casi óptima
Por ejemplo, la ecua-
esión

C(s)]s E

controladores nor-
algoritmo de veloci-
on designaciones de
m se presenta al sis-
cidad indica que el
recientemente pre-
ula. Si se emplea el
es más bien la nue-
misma.
dor de computadora
ores normales, debi-
reo periódico de en-
n lugar de entradas

dos con entrada de
de controlador con
para computar una
s una operación ins-
lador normal o a un
ón de retroalimenta-
-176 se presenta un
control, en donde el
ontrolador del volu-
ble de proceso.

En este caso, para un sistema totalmente computarizado, el modelo se divide en tres partes: una parte es el cálculo de la entrada al controlador computarizado; la segunda es el modelo requerido para ejecutar la compensación de tiempo muerto del controlador computarizado, y la tercera el controlador normal computarizado.

Como se ilustra en la figura 22-3, en sistemas de control de alimentación directa, el modelo necesario para el controlador es, casi siempre, un modelo muy real de una porción del proceso. En estas condiciones, el flujo y la temperatura del fluido de proceso dan instantáneamente el calor requerido para mantener constante la temperatura de salida del proceso. En otras palabras, $M = k(\text{flujo})(T - T_0)$, en donde T_0 es la temperatura deseada de la corriente de salida del proceso y T la temperatura del fluido de entrada. Este es un controlador solamente proporcional.

En situaciones más complejas de alimentación directa como las que se ilustran en la sección "Control de columnas de destilación", con referencia a la figura 22-175, el modelo necesitará algunas características dinámicas del proceso para poder sustentar una operación suave del mismo.

Modelos de estado estacionario Al recorrer en sentido ascendente la jerarquía de control, la frecuencia de modificación de las señales de control va en disminución. Los modelos representan la computación de variables que son fijas hasta que se vuelven a calcular, momento en que la variable se desplaza inmediatamente al nuevo valor. Estos son los que se conocen como modelos de estado estacionario. Se pueden imponer restricciones en estos modelos, como, por ejemplo, límites específicos o velocidades de cambio estipuladas que no se puedan exceder. Estas restricciones pueden indicarse en forma explícita en el modelo, o bien, pueden ser el resultado de alguna limitación del proceso, de tal manera que no sea factible realizar un movimiento subsecuente de la variable, incluso a pesar de que así lo indique la computación.

Los modelos de estado estacionario se emplean al nivel del controlador convencional. Con frecuencia se utilizan para determinar puntos de referencia de controladores cuyas variables medidas son variables dinámicas computadas de entradas múltiples, como, por ejemplo, la velocidad de producción de un reactor, el índice de reflujo de un fraccionador o la velocidad de producto del fraccionador, tal como se describe en la parte correspondiente a "Control de operaciones unitarias". Los modelos de estado estacionario se emplean, casi siempre, al nivel de procesos unitarios para determinar y ajustar los puntos de referencia de las variables de rendimiento de las operaciones unitarias, por ejemplo, las especificaciones de pureza y las divisiones de alimentación para cada par de fraccionadores, como los que aparecen en la figura 22-152 y el volumen de producción y los puntos de referencia de especificación de polímeros para reactores individuales, como se observa en la figura 22-154.

Las ecuaciones o los modelos de estado estacionario se derivan de la información del diseño de proceso, las relaciones teóricas o la información experimental obtenida de la operación o la simulación de un proceso. Uno de los peligros al utilizar el diseño o la información teórica para desarrollar los modelos, es que se pueden incluir demasiados detalles. Por otro lado, si sólo se utilizan datos experimentales, es probable que haya relaciones importantes que queden oscurecidas, debido a la dificultad de realizar experimentos definitivos en la planta con equipo a escala de planta. Las técnicas de simulación ofrecen un término medio aceptable entre el desarrollo teórico y el experimental de las ecuaciones de estado estacionario. En la parte que aparece bajo el título "Análisis del sistema de control" se presentan detalles adicionales sobre el desarrollo de ecuaciones o modelos de control.

Modelos dinámicos Los modelos o ecuaciones de control de tipo dinámico son aquellos que dan una señal de control que varía con el tiempo, o bien, una señal que depende de la variación de tiempo de una variable de proceso medida. Los modelos dinámicos son, por lo común, ecuaciones diferenciales o su equivalente expresados en términos como ecuaciones integrales y funciones de transferencia.

Una ilustración del empleo de los modelos dinámicos es la compensación del tiempo muerto que aparece en la figura 22-55. Otro ejemplo es el controlador de tipo predictivo para el control de fraccionamiento, que se muestra en la figura 22-175. Una tercera ilustración es el cálculo y el control de la concentración de reactivos en el reactor representado en la figura 22-191. En cada una de estas ilustraciones, las características dinámicas forman parte del modelo de una forma algo distinta.

En el sistema de compensación del tiempo muerto, el modelo dinámico proporciona una respuesta simulada para la acción de control, en donde el tiempo muerto se ha eliminado de la señal de retroalimentación. Así, pues, esta respuesta simulada se compara con la respuesta de proceso en una base de tiempo real de proceso para obtener una acción de control subsecuente.

En el sistema de control predictivo del fraccionador, el modelo dinámico suministra la acción del control en el tiempo real de proceso, para compensar el cambio en la velocidad y composición, conforme estos cambios se desplazan por el fraccionador.

En el sistema de control de la concentración del reactivo, el carácter dinámico del modelo consiste en proporcionar concentraciones de reactivo en tiempo real para la acción de control, integrando en forma continua los flujos de entrada, los flujos de salida y la velocidad de reacción. La computación de la concentración se compara con el análisis en la corriente que se obtuvo automáticamente poco después de que se desarrolló la acción de control.

Por encima del nivel de proceso unitario en la jerarquía de control, hay realmente poca necesidad de modelos de control de proceso dinámicos. Si los controles de la operación unitaria se diseñan para regular las variables de rendimiento de la operación unitaria, reduciendo sus grados de libertad a casi cero, la necesidad de modelos dinámicos para el control del proceso por encima del nivel de operación unitaria es muy reducida.

En las partes tituladas "Ajuste del controlador" y "Análisis del sistema de control" se analizan las técnicas para obtener modelos dinámicos para el control de procesos.

COMPUTADORAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS

En el control de procesos se emplean tanto computadoras analógicas como digitales. Las computadoras analógicas representan los números que se manipulan por medio de la magnitud de una cantidad física, como, por ejemplo, volts o presión (pascales o libras fuerza por pulgada cuadrada). Las operaciones matemáticas se desarrollan de manera continua y, si la red de la computadora tiene varias ramificaciones o bifurcaciones, varias operaciones se ejecutan en forma paralela o simultánea. En computadoras analógicas, la precisión de computación disponible está limitada por la precisión con que la salida de la computadora se puede medir. La exactitud está limitada por la exactitud de las mediciones del proceso y su conversión al medio físico con que opera la computadora.

Las computadoras digitales son dispositivos de recuento o conteo, que operan directamente con números para efectuar las cuatro operaciones aritméticas fundamentales: suma, resta, multiplicación y división. Estas operaciones matemáticas se efectúan por medio de operaciones discretas de máquina en serie. Las instrucciones que indican a la computadora que ejecute tales operaciones se almacenan como programas en la memoria de la misma. La precisión de computación disponible es fundamentalmente ilimitada. La exactitud está limitada por la exactitud de las mediciones del proceso y su conversión en señales expresadas en dígitos.

Estas dos clases de máquinas se pueden utilizar para resolver ecuaciones aritméticas y diferenciales, de donde la elección del tipo de computadora se determinará de acuerdo con el trabajo de control que se desea realizar y el costo para lograrlo. En la figura 22-158 se ilustra el costo básico en función de las características de tamaño del trabajo para sistemas de control por computadora digital y analógica. Dicho de otra manera, los costos del sistema de control con computadora analógica dependen de la magnitud del trabajo, principiando a un nivel bajo; mientras que los costos del sistema de control con computadora digital principian a un nivel superior, con menor dependencia de la

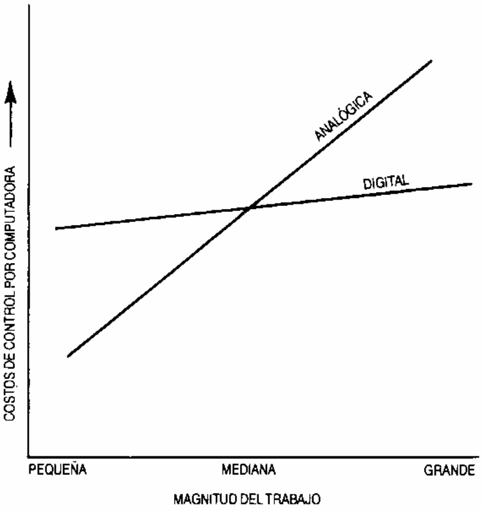


FIG. 22-158 Costos relativos de los sistemas de control con computadora analógica y digital.

magnitud del trabajo. El gran número de computadoras digitales de tamaño variable que están en el mercado, y los precios que varían con suma rapidez, dificultan la tarea de formular proposiciones generales respecto al costo en función de la magnitud del trabajo. Cuando la magnitud o el tamaño del trabajo no indica una elección bien definida, hay otros factores que adquieren importancia especial. Algunos de ellos se indican en la tabla 22-10.

TABLA 22-10 Características especiales que ayudan a seleccionar el tipo de computadora de control

Ventajas analógicas	Ventajas digitales
Menor costo para sistemas pequeños	Menor costo en sistemas mayores
Más flexible en sistemas pequeños	Más flexibilidad en sistemas más grandes
Las técnicas empleadas son más fam. al personal de instrument. de la planta	Las técnicas utilizadas son más fam. a los ingenieros de procesos
Cuenta con procedimientos de búsq. de fallas más conocidos	Se dispone de una mayor precisión de computación
Computación en paralelo; de donde, las fallas de los comp. no necesariamente suspenden el funcionamiento de todo el sistema	Es capaz de manejar procedimientos complejos, como la optimización
Es más inmune al ruido	Almacenamiento de datos libre de deriva
Entrecara menos compleja, con mediciones analóg. y otras instrumentaciones	Menor costo de expansión

Requisitos generales de equipos (*hardware*) Hay unos cuantos requisitos importantes de equipos y máquinas que se deben satisfacer con la computadora de control de proceso, ya sea que se trate de tipo analógico o digital. Puesto que un sistema de control debe operar esencialmente 24 horas al día, año tras año, un requisito normal para la computadora y su equipo de entrada-salida es la disponibilidad en línea de más del 99%.

Otro requisito igualmente importante es que todos los componentes del sistema de control de computadora satisfagan los requisitos de seguridad de la zona de proceso en que estén localizados. Este requisito para instrumentos pequeños de equipo electrónico se puede satisfacer por los métodos tradicionales. Los artículos de mayor tamaño se manejan purgando aire o recurriendo a un diseño intrínsecamente seguro, o bien, ubicándolos en una zona dedicada a fines generales.

Un tercer requisito es que el sistema se diseñe de tal manera que se le dé un mantenimiento rápido y con el personal normalmente disponible. Para satisfacer este requisito, basta recurrir al diseño modular y aplicar buenos procedimientos de diagnóstico.

En algunas ocasiones, un dispositivo de medición del sistema de control por computadora se comparte por un indicador o controlador de refuerzo. En estos casos, la entrecara del instrumento de proceso de la computadora se debe diseñar de tal manera, que la operación de la misma no afecte al indicador o al controlador de apoyo.

Los sistemas de control por computadora que se deben mantener en operación durante interrupciones de la energía eléctrica requieren una fuente de alimentación secundaria. Si se necesita corriente alterna, también se debe instalar un inversor.

Equipos analógicos El equipo de control con computadora analógica es, casi siempre, electrónico, electromecánico o neumático. Los sistemas neumático y electromecánico se limitan, por lo común, a unas cuantas operaciones de computación: los dispositivos electrónicos son los que se utilizan para computaciones más complejas. La computación electrónica analógica se explica bajo los títulos "Análisis de sistemas de control" y "Controladores automáticos", así como en la sección 2.

La programación de las computadoras analógicas para servicio de control es esencialmente la misma que la que se emplea para la simulación analógica. Véase "Simulación analógica" bajo "Análisis de sistemas de control."

En la subsección titulada "Control de operaciones unitarias" se encontrarán varios ejemplos de aplicaciones de control con computadora analógica. Todos los ejemplos de control computarizado ilustrados en esos párrafos se han puesto en práctica con equipos analógicos. Muchos de ellos se han ejecutado con equipos neumáticos.

Las unidades de procesamiento en paralelo se pueden controlar con una sola computadora analógica, como se observa en la figura 22-159. En este caso, el bloque A representa la amplificación de las señales de medición de proceso de bajo nivel, y el bloque H representa un dispositivo de retención para conservar la señal de salida hasta que se disponga de una nueva.

Equipos digitales Los equipos y maquinarias que se necesitan para el sistema de control con computadora digital se subdividen en tres partes: el marco principal o unidad central de procesamiento, CPU; la entrecara y la entrada y salida del proceso, I/O.

Los requerimientos de equipo difieren para los diversos niveles de control. Los sistemas de control digital de tipo directo (DDC) requieren muchas entradas, una exploración rápida, computaciones relativamente rápidas, muchas salidas, equipos de apoyo y la mayor seguridad posible que pueda permitir la economía.

Los sistemas de control de punto de ajuste, denominados a veces sistemas de control de supervisión, necesitan en general menos entradas, pocos equipos de refuerzo, una exploración más lenta y también velocidades de computación relativamente más bajas.

Un sistema de optimización en línea puede requerir muchas computaciones basadas en relativamente pocas variables de proceso (véase la figura 22-151). Puesto que generalmente se necesitan nuevos valores óptimos del parámetro de control a intervalos poco frecuentes, no siempre se requiere una computación de muy alta velocidad. Sin embargo, quizá se requiera un programa amplio y, por tanto, una memoria correspondiente grande.

En consecuencia, las combinaciones de control DDC, de punto fijo y optimización pueden llevar a sistemas de computadora bastante grandes en plantas de gran tamaño.

La diferencia principal entre una computadora de control de proceso y una computadora usual de tipo científico o de negocios es el medio de tiempo real en que la computadora de control trabaja, en comparación con el medio de lotes en que operan las computadoras de negocios y de tipo científico. Las acciones que desempeña la computadora dependen por lo común del tiempo, o bien, de los eventos. Las acciones

o se puede satisfacer
iayor tamaño se ma-
ínsecamente seguro,
generales.
de tal manera que se
normalmente dispo-
·al diseño modular y

ición del sistema de
icador o controlador
mento de proceso de
ue la operación de la
apoyo.
e deben mantener en
éctrica requieren una
ita corriente alterna,

imputadora analógica
imático. Los sistemas
omún, a unas cuantas
rónicos son los que se
nputación electrónica
sistemas de control" y
ón 2.
jicas para servicio de
emplea para la simu-
bajo "Análisis de sis-

ones unitarias" se en-
trol con computadora
larizado ilustrados en
ipos analógicos. Mu-
áticos.
pueden controlar con
a en la figura 22-159.
ción de las señales de
' representa un dispo-
lida hasta que se dis-

que se necesitan para
se subdividen en tres
ocesamiento, CPU; la

s diversos niveles de
directo (DDC) requie-
nputaciones relativa-
y la mayor seguridad

denominados a veces
general menos entra-
más lenta y también
bajas.
uerir muchas compu-
les de proceso (véase
ecesitan nuevos valo-
s poco frecuentes, no
ta velocidad. Sin em-
or tanto, una memoria

ol DDC, de punto fijo
omputadora bastante

de control de proceso
negocios es el medio
l trabajo, en compara-
putadoras de negocios
ia la computadora de-
eventos. Las acciones

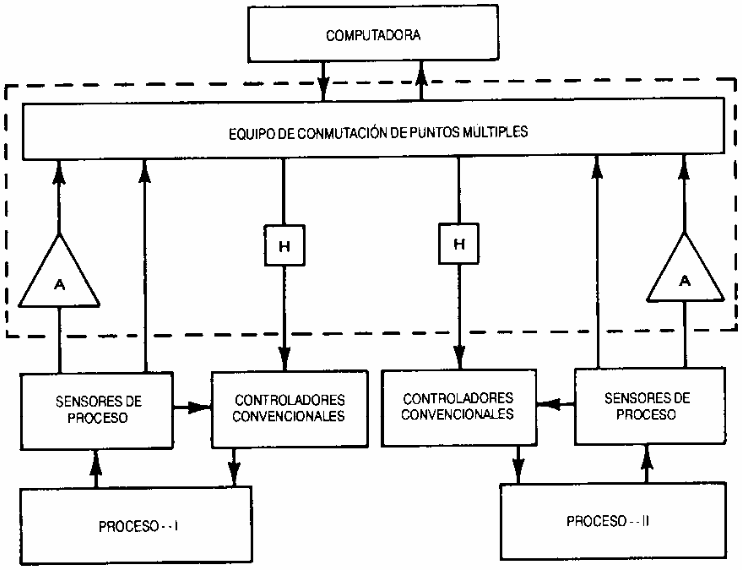


FIG. 22-159 Configuración típica de un controlador con computadora analógica para controlar procesos duplicados múltiples.

dependientes del tiempo se programan por medio de un reloj de tiempo real. Las acciones dependientes de los eventos se programan por orden de prioridad, de acuerdo con el sistema de interrupción. El sistema de interrupción y sus programas asociados tienen la capacidad de detener la computadora en medio de un programa, haciéndola que ejecute alguna otra acción o computación, para volver después a su programa original, reiniciando en el punto en donde se detuvo.

Otra diferencia es que la computadora de control ejecuta, casi siempre, sus computaciones con una longitud de palabra más corta que la computadora de negocios, o científica. Esto se debe a la exactitud y resolución limitada de la medición del proceso y el equipo de manejo del mismo.

Programas y sistemas de programación (*software*) En el material de programación existen dos clases de programa de control de proceso por computadora: los programas de sistema y los de aplicación. Los primeros, llamados comúnmente *programa ejecutivo* o *sistema de operación*, se ocupan del funcionamiento dentro del tiempo real del sistema de control con computadora. Organizan las operaciones del equipo y la maquinaria (*hardware*) en secuencias ordenadas que proporcionan una utilización eficiente de la unidad aritmética, la de memoria, el equipo periférico y el equipo de control de proceso.

Los programas de aplicación desempeñan funciones específicas que justifican el diseño y la instalación del sistema, por ejemplo, computando los puntos de referencia del controlador, regulando las variables de proceso y activando una alarma si una variable sobrepasa el valor predeterminado. La complejidad de este material de programación y la cantidad de conocimientos del proceso y control requeridos para ponerlo en práctica deben recibir la atención adecuada. Casi siempre sucede que los programas de aplicación se deben elaborar para cada proceso e instalación individual. También depende el material de programación del sistema con que se cuente para utilizarse con la computadora.

Un elemento importante para poner en práctica el programa de aplicación es el lenguaje que se utilizará para escribir dicha programación. Los lenguajes que se emplean para comunicarse con la computadora se dividen en tres niveles: los lenguajes de máquina, los simbólicos de ensamblaje y los de más alto nivel.

Los lenguajes de más alto nivel permiten estipular la solución de un problema en una forma más comprensible para el programador. Estas proposiciones o enunciados se traducen después por medio de otro programa dentro de la computadora, siguiendo una secuencia de instrucciones en lenguaje de máquina. Uno de los primeros de estos lenguajes que se utilizaron fue el FORTRAN. Los matemáticos, científicos, ingenieros y otros más emplean mucho este lenguaje con computadoras en su trabajo cotidiano.

Los lenguajes de más alto nivel permiten escribir programas en menos tiempo. No obstante, existe cierta compensación en sistemas pequeños, entre el costo de la memoria adicional que se requiere para utilizar lenguajes a nivel superior, y el que representa la programación en máquina o un lenguaje de ensamblaje. Hay casos en que un pequeño sistema de control no justificará económicamente la memoria adicional necesaria para utilizar lenguajes de más alto nivel.

CONTROL DE OPERACIONES UNITARIAS

REFERENCIAS GENERALES: D.E. Lupfer, "*Distillation Column Control for Utility Economy*," presentado en la 53a convención anual GPA en Denver, marzo 25-27, 1974. F. G. Shinskey, *Distillation Control*, McGraw-Hill, New York, 1977.

Se han seleccionado algunos ejemplos de control de operaciones unitarias, a partir de los cuales los usuarios de esta *Biblioteca del Ingeniero Químico* encontrarán ideas para resolver problemas de control de

operaciones unitarias en lugar de ofrecer una investigación general de las operaciones unitarias y los sistemas de control aplicables.

CONTROL DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Control directo del vapor Existen ciertas configuraciones de equipo utilizadas en los intercambiadores de calor. Para los fines ilustrativos propuestos se ha utilizado un diseño simple de coraza y tubos. Éste contiene un solo tubo en U en la coraza, para los sistemas que emplean vapor como medio de calentamiento, con un deflector lateral para la coraza que se agrega para aplicaciones de intercambio de calor líquido-líquido.

El método más común de control para el intercambiador de calor es el que se ilustra en la figura 22-160. El controlador utiliza la temperatura de salida del producto como base para regular automáticamente la velocidad de flujo del vapor.

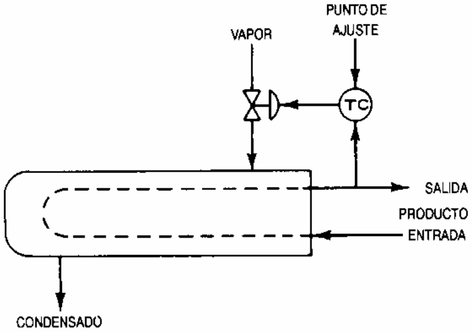


FIG. 22-160 Control convencional de un intercambiador de calor.

Hay algunas características de diseño para el sistema de control que requieren una atención particular. El grado de atención necesario depende de la calidad de control requerida por el proceso.

Medición de la temperatura Tanto la ubicación como el método de instalación del dispositivo para medir la temperatura tienen efectos importantes en la calidad del control de temperatura del efluente del intercambiador. Si se tienen unos cuantos metros de tubería entre el intercambiador y el dispositivo de medición de temperatura, se agrega un tiempo muerto, que puede ser tan grande o mayor que la constante de tiempo del intercambiador. Si el dispositivo de medición de temperatura se coloca dentro de un pozo térmico, se puede agregar otra constante de tiempo al circuito de control de retroalimentación, lo cual limita la calidad de control obtenible.

Si se requiere un desempeño de gran calidad para el sistema de control, el dispositivo para medir la temperatura se debe situar directamente dentro del fluido de proceso, a menos que algún problema de mantenimiento, seguridad o del mismo proceso indique que se requiere un pozo térmico.

Válvulas de control Los intercambiadores de calor operan comúnmente en un intervalo amplio de cargas tratadas. Este intervalo amplio requiere la ubicación exacta de la válvula de control y una ganancia casi constante en todo el intervalo de la válvula. Por consiguiente, se emplean posicionadores de válvula y se debe estudiar con sumo cuidado el tamaño y el tipo de configuración de válvula que sea conveniente utilizar; normalmente se utiliza una configuración de igual porcentaje.

Control del condensado El patrón de control ilustrado en la figura 22-161 da, por lo común, un desempeño dinámico relativamente lento. No se debe utilizar, a menos que se tenga alguna ventaja especial en su empleo o que su rendimiento sea compatible con los requisitos del proceso.

En este sistema, el control se deriva a través de la modificación del área de intercambio calorífico del vapor mediante la manipulación del nivel del condensado dentro de la coraza o la cubierta. Existe gran diferencia en el carácter del cambio sufrido en la superficie expuesta al vapor, en comparación con el nivel del condensado, cuando se compara un conjunto de tubos con un solo tubo en U. Esta variación es una función tanto de la forma de la cubierta como de la geometría del tubo.

Véase el peor de los casos, que es el tubo doblado en U con el intercambiador montado en la posición horizontal (Fig. 22-161*a*). Conforme se eleva el nivel del condensado, no se registra ningún cambio en el área de intercambio calorífico del vapor hasta que el condensado llega a la base del tubo, en donde se registra una variación brusca. Conforme sigue ascendiendo el nivel, la forma combinada de la coraza y el tubo dan un cambio extremadamente no lineal dentro de la zona de intercambio de calor, hasta que se llega a la parte superior del tubo inferior. Conforme asciende más aún el nivel, sólo el tubo en U participa en el cambio dentro de la zona de intercambio calorífico. Cuando se llega a la base del tubo superior, existe la misma situación que en el tubo inferior. Este grado de no linealidad presenta una situación de control extremadamente difícil si se espera tener un buen control de la temperatura en un intervalo amplio de cargas tratadas. Si la coraza tiene una forma que minimice el volumen del condensado, y el intercambiador se monta en posición vertical como se ilustra en la figura 22-161*b*, o bien, si se coloca en un ángulo pronunciado, el funcionamiento del control se mejorará notablemente.

Control de la presión de vapor El sistema de control en cascada que aparece en la figura 22-162 es muy eficaz para reducir la respuesta a la temperatura de proceso ante las perturbaciones que afectan la presión del vapor.

El controlador de temperatura ajusta el punto de referencia de un controlador de presión de la coraza. El controlador de presión regula la velocidad del vapor y tiene un respuesta rápida a las perturbaciones de presión. Como sucede con todos los sistemas en cascada, éste requiere dos circuitos normales de controlador.

Métodos de control por derivación del flujo (*bypass*) Con frecuencia se encuentra ventajoso controlar la temperatura del producto regulando una velocidad de flujo de desviación o derivación del intercambiador. Este método se emplea cuando el medio de calentamiento es una corriente de proceso cuyo flujo no se puede manejar por medio del controlador de temperatura. La línea de desviación puede estar en cualquiera de los lados del intercambiador de calor como se indica en la figura 22-163. La configuración de *b*), que es la derivación de la corriente calentada, da casi siempre un mejor control de temperatura, debido a la constante de tiempo más breve que se tiene en el circuito de control.

Una configuración de control por derivación, que incluso es mejor, aunque más costosa, para intercambiadores de calor con vapor, aparece en la figura 22-164. El controlador de la temperatura maneja la válvula de tres posiciones para regular la velocidad de desviación del producto y mantener la temperatura de salida. La respuesta rápida del arreglo de derivación permite ejercer un buen control de la temperatura. Para que la calidad del control se mantenga a un nivel elevado en un intervalo amplio de carga tratada, la salida del controlador de temperatura, que representa también la colocación de la válvula de tres posiciones, es lo que utiliza el controlador de posición de válvula (VPC) como la entrada de la variable medida. Cuando el controlador de posición de válvula se ajusta a una respuesta lenta en relación con el controlador de la temperatura, regula el flujo de vapor para mantener a la válvula de tres posiciones en una posición cercana a la región intermedia.

Control de alimentación directa Todos los métodos de control de temperatura para el intercambio de calor están sujetos a perturbaciones en la velocidad del flujo del producto, la temperatura de entrada del producto y la calidad del vapor. Los sistemas bien diseñados suelen controlar muy bien la temperatura de salida si el controlador de re-

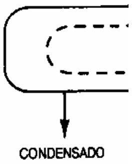


FIG. 22-162 Co

compatible con los

de la modificación
liante la manipula-
o la cubierta. Exis-
ido en la superficie
l del condensado,
olo tubo en U. Esta
ubierta como de la

oblado en U con el
tal (Fig. 22-161*a*).
se registra ningún
vapor hasta que el
registra una varia-
el, la forma combi-
adamente no lineal
a que se llega a la
nde más aún el ni-
ntro de la zona de
del tubo superior,
r. Este grado de no
madamente difícil
ura en un intervalo
orma que minimice
r se monta en posi-
, o bien, si se coloca
l control se mejora-

control en cascada
reducir la respuesta
s que afectan la pre-

de referencia de un
or de presión regula
a las perturbaciones
en cascada, éste re-

ypass) Con frecuen-
el producto regulan-
del intercambiador.
iento es una corrien-
edio del controlador
en cualquiera de los
la figura 22-163. La
nte calentada, da casi
constante de tiempo

ue incluso es mejor,
or con vapor, apare-
atura maneja la vál-
desviación del pro-
espuesta rápida del
rol de la temperatu-
un nivel elevado en
controlador de tem-
e la válvula de tres
osición de válvula
ando el controlador
nta en relación con
vapor para mantener
rcana a la región in-

étodos de control de
jetos a perturbacio-
peratura de entrada
en diseñados suelen
l controlador de re-

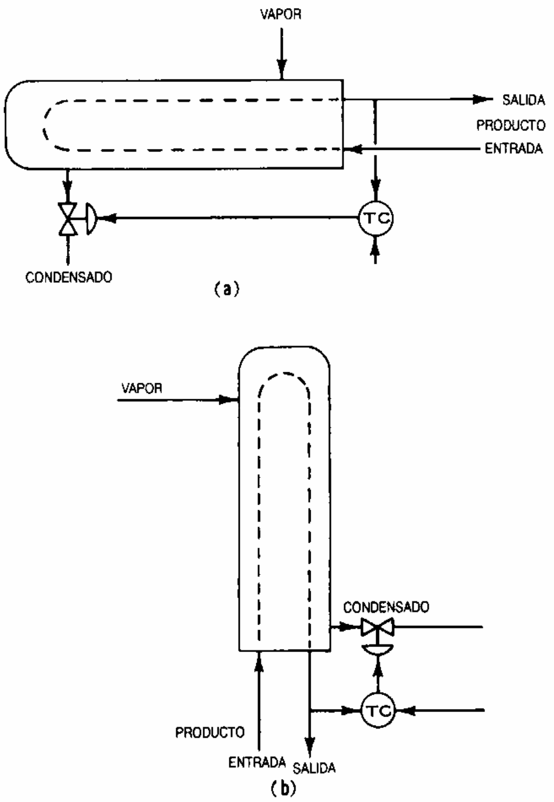


FIG. 22-161 Control del condensado por estrangulamiento. *a*) Construcción convencional e instalación orientada al mantenimiento. *b*) Instalación orientada al control.

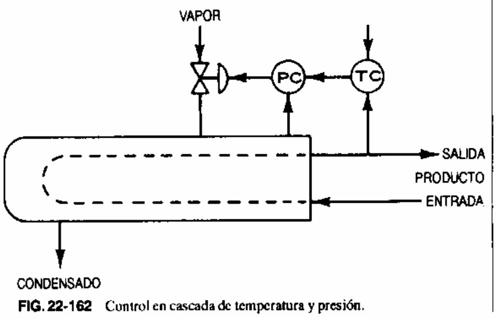


FIG. 22-162 Control en cascada de temperatura y presión.

troalimentación está debidamente ajustado para las condiciones prevalecientes. No obstante, la función de transferencia de un intercambiador de calor cambia notablemente con las condiciones de operación. Se registra un cambio extremo en la función de transferencia cuando la temperatura de salida del producto se acerca al punto de burbuja o al punto de condensación, como se ilustra en la figura 22-165.

La ganancia del estado estacionario del proceso, G_p, es el cambio de temperatura por unidad de cambio en la velocidad del vapor, o sea, $G_p = dT/dS$. Por tanto, la ganancia del proceso en cualquier punto de operación está dada por la pendiente de la curva ilustrada en la figura 22-165.

Si el punto de operación se encuentra en la región completamente líquida, en *A*, la ganancia de proceso es mayor y el controlador de temperatura requerirá una ganancia baja. Sin embargo, si dicho punto se cambia a la región parcialmente vaporizada, en *B*, se necesita una ganancia proporcional mayor para ejercer un buen control. Puesto que el estado físico del producto puede variar debido a cambios del punto de referencia, las variaciones de temperatura o los cambios de composición del producto, el controlador debe ajustarse o sintonizarse después de cada cambio de estado importante. Una práctica nor-

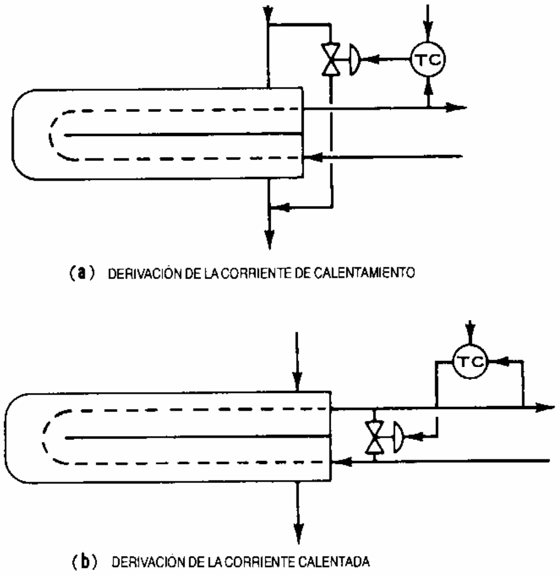


FIG. 22-163 Control por derivación (*bypass*) de intercambiadores de calor de producto a producto.

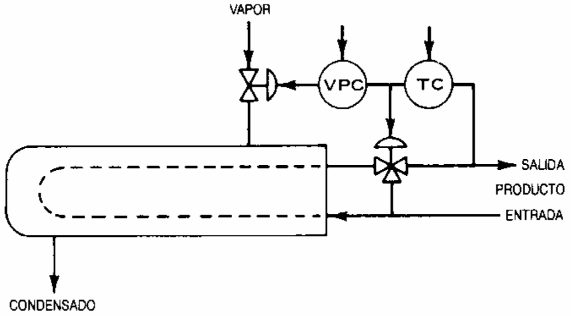


FIG. 22-164 Control por derivación de un intercambiador de calor de vapor.

mal, aunque no del todo eficiente, consiste en ajustar el controlador para que sea estable en todas las condiciones de operación. Usualmente, esta práctica genera un control deficiente cuando la ganancia de proceso es pequeña.

Aunque la operación en torno al punto de burbuja del producto presenta variaciones obvias en la ganancia de proceso, el funcionamiento en la región todo líquido o todo vapor requiere también, con frecuencia, cambios en los ajustes del controlador para lograr un buen control. Véase la ecuación de estado estacionario para el calor agregado por el intercambiador,

$$h_s S = FC_p(T_2 - T_1) \qquad (22\text{-}37)$$

en donde h_s = entalpía de vapor, S = velocidad de flujo del vapor, F = velocidad del producto, C_p = calor específico del producto, T_2 = temperatura de salida del producto, y T_1 = temperatura de entrada del producto. Si se toma la derivada de la ecuación (22-37), con respecto al flujo de vapor, la ganancia del estado estacionario del proceso es $G_p = dT_2/ds = h_s/fC_p$. Por consiguiente, la ganancia del estado estacionario es inversamente proporcional a la velocidad de flujo F. La ganancia de proceso con respecto a la relación vapor-producto es una constante expresada por $G_p = dT_2/d(S/F) = h_s/C_p$.

Los cambios en la ganancia del proceso se compensan mediante un ajuste automático de la ganancia del controlador, como una función de la velocidad de flujo del producto, o bien, utilizando el controlador de temperatura para regular la relación vapor a producto, como se ilustra en la figura 22-166. Esa es una forma elemental de combinar el control de alimentación directa con el de retroalimentación.

Control de la entalpía por medio de la alimentación directa El objetivo del control del intercambiador de calor consiste en mantener

una entalpía de sali
mas de control con
lograr este fin. Los
ren una cantidad p
normal opera el el
esos sistemas en lo
La ecuación de
producto a produc

H_p = C

en donde H_p = ent
específico de la co
entrada de la corri
= calor específico
flujo de la corrie
corriente calentad
lentamiento, y T_3
miento. Esta ecu
salida utilizada c
mo se demuestra
La ecuación de
con calentamient

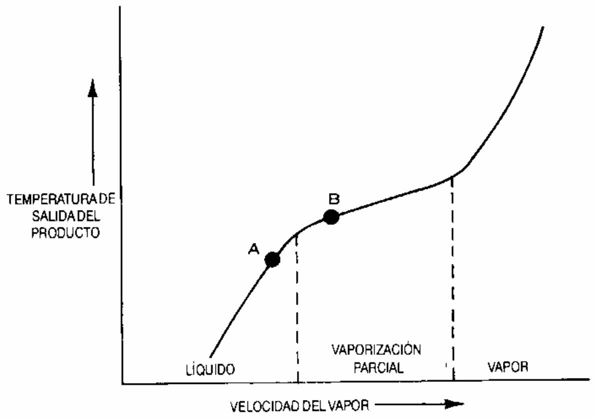


FIG. 22-165 Temperatura de salida del intercambiador en función de la velocidad del vapor, para un volumen de producción constante cerca de la temperatura de vaporización.

una entalpía de salida de producto específica. Se pueden diseñar sistemas de control computarizado simples con alimentación directa, para lograr este fin. Los tres ejemplos que se dan a continuación sólo requieren una cantidad pequeña de equipo de computadora, y un controlador normal opera el elemento de control final. También es factible incluir esos sistemas en los de control por computadora de mayor tamaño.

La ecuación de balance de calor para un intercambiador de calor producto a producto es:

$$H_p = C_{p1}(T_1 - T_0) + C_{p2}(F_2/F_1)(T_3 - T_2)$$

en donde H_p = entalpía de salida de la corriente calentada, C_{p1} = calor específico de la corriente calentada, en la entrada, T_1 = temperatura de entrada de la corriente calentada, T_0 = temperatura de referencia, C_{p2} = calor específico de la corriente de calentamiento, F_2 = velocidad de flujo de la corriente de calentamiento, F_1 = velocidad de flujo de la corriente calentada, T_2 = temperatura de salida de la corriente de calentamiento, y T_3 = temperatura de entrada de la corriente de calentamiento. Esta ecuación se puede mecanizar y calcular la entalpía de salida utilizada como señal de medición para un control estándar, como se demuestra en la figura 22-167.

La ecuación del balance de calor para un intercambiador de calor con calentamiento de vapor es:

$$H_p = C_p(T_1 - T_0) + h_s(S/F) \qquad (22\text{-}38)$$

en donde H_p = entalpía de salida del producto, C_p = calor específico del producto, T_1 = temperatura de entrada del producto, T_0 = temperatura de referencia, h_s = contenido calorífico del vapor, S = velocidad de flujo del vapor, y F = velocidad del flujo del producto. Si la velocidad de flujo del vapor es una entrada al controlador de alimentación directa y se mecaniza la ecuación (22-38), el sistema de control resultante es el que aparece en la figura 22-168. En este caso, la entalpía de producto deseado, H, es el punto de referencia, y H_p se utiliza como la variable calculada para el controlador convencional de entalpía HC.

Al resolver la ecuación (22-38) para la velocidad de flujo del vapor,

$$S = (F/h_s)[H - C_p(T_1 - T_0)]$$

en donde H_p se convierte en H, que es la entalpía deseada. En la ejecución ilustrada en la figura 22-169, S, que es la velocidad de flujo del vapor, es la variable de alimentación directa calculada y se emplea como punto de ajuste de cascada para el controlador de flujo de vapor, H, que es la entalpía de producto deseada, es el punto de ajuste para el proceso de alimentación directa.

Estos sistemas de control de entalpía computarizada pueden requerir la adición de una compensación dinámica, con el fin de ejecutar la

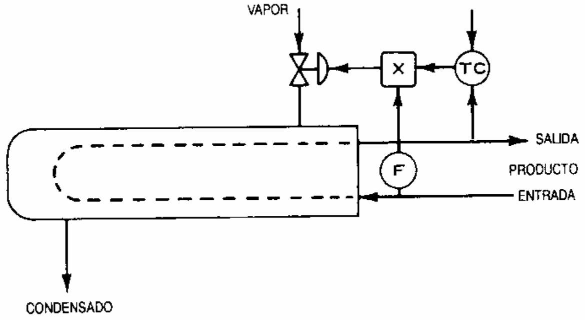


FIG. 22-166 Manipulación de la relación vapor-producto.

ıra de entrada del pro-
2-37), con respecto al
io del proceso es G_p =
el estado estacionario
lujo F. La ganancia de
ıcto es una constante

mpensan mediante un
; como una función de
ındo el controlador de
ducto, como se ilustra
le combinar el control
ɔión.
ıentación directa El
consiste en mantener

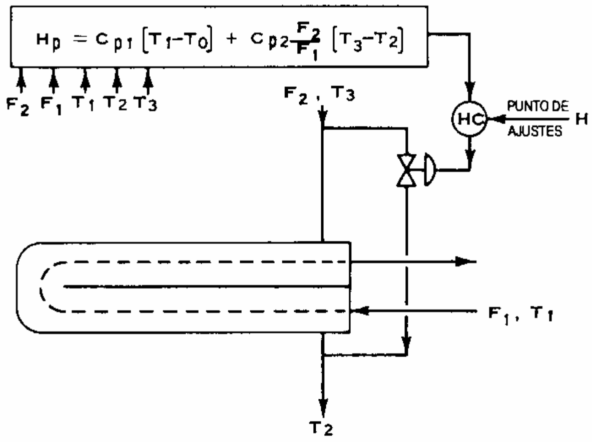


FIG. 22-167 Control computarizado de la entalpía en un intercambiador de calor de producto a producto.

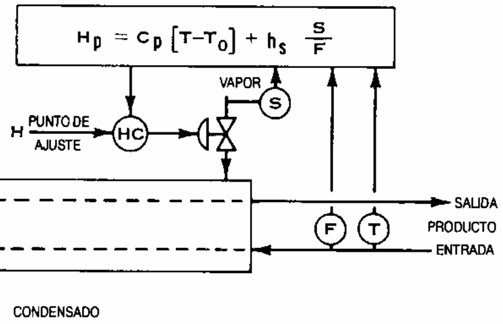


FIG. 22-168 Control computarizado de la entalpía. El gasto de vapor es una entrada al controlador.

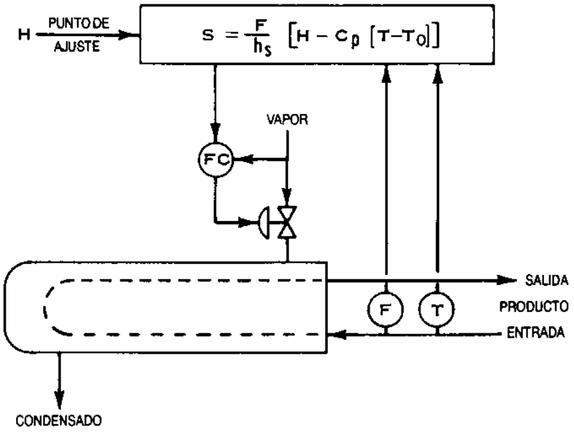


FIG. 22-169 Control computarizado de la entalpía. El flujo de vapor es la variable calculada como punto de ajuste.

acción de control e
mentáneas de enta
quizá sea conveni
temperatura en la
en la medición del
se calculan por m
calor, o bien, bas
que describan la o

CONTROL DE (

La capacidad de u
reducir el costo de
peración del comp
da. Aún cuando l
diversos procesos,
jetivos de operaci
ningún sistema de
sólo se presentan l
el diseño y operac
lación continua p
más avanzados só
especificada con a
trol de estos equi
presentar una revi
afectar la operació

Controles bás
control para un p
laciona a la oper
encia a la capació
que puedan resul
que se sujeta la c
de las variables m
de destilación.

La operación
cuando se manip
energía suministr

TABLA 22-11

Variables d
No control
Composición de la ali
Velocidad de aliment
Entalpía de alimenta
Temperatura del refl
Entalpía del medio d calentamiento

acción de control en el tiempo correcto, para evitar perturbaciones momentáneas de entalpía en la alimentación corriente abajo. Por ejemplo, quizá sea conveniente retrasar la respuesta del vapor a un cambio de temperatura en la entrada, insertando un retraso en la computadora o en la medición de la temperatura. Estas constantes de tiempo de retraso se calculan por medio de pruebas dinámicas en el intercambiador de calor, o bien, basándose en ecuaciones diferenciales o simulaciones que describan la operación del intercambiador de calor.

CONTROL DE COLUMNAS DE DESTILACIÓN

La capacidad de un sistema de control de destilación eficaz tendiente a reducir el costo de los equipos, incrementar la capacidad o lograr la recuperación del componente clave, ya se conoce de una manera muy adecuada. Aún cuando las columnas de destilación forman parte principal de diversos procesos, cada una de ellas tiene un conjunto específico de objetivos de operación y restricciones. Esta es la razón que determina que ningún sistema de control de destilación sea universal. En esta subsección sólo se presentan los conceptos y técnicas que deberían considerarse en el diseño y operación de sistemas de control para las columnas de destilación continua para dos productos. Nótese que los sistemas de control más avanzados sólo afectarán una operación que produce una separación especificada con anterioridad. El espacio destinado al tema sobre el control de estos equipos de operación es reducido y por eso no es posible presentar una revisión detallada de los sistemas de control que podrían afectar la operación óptima (menor costo).

Controles básicos El objetivo principal de cualquier sistema de control para un proceso es la estabilidad. Cuando la estabilidad se relaciona a la operación de una columna de destilación, se hace referencia a la capacidad que el sistema tiene para prevenir perturbaciones que puedan resultar de cambios en las variables independientes a las que se sujeta la operación. En la tabla 22-11 se proporciona una lista de las variables más comunes que afectan la operación de una columna de destilación.

La operación más estable de una columna de destilación se tiene cuando se manipulan independientemente el producto obtenido y la energía suministrada (o extraída), de manera que se pueda producir la

TABLA 22-11 Clasificación de las variables de destilación

Variables de entrada (independientes)		
No controlada	Manipulada	Variable de salida (dependiente)
Composición de la alimentación	Relación de reflujo	
Velocidad de alimentación	Índice de ebullición	
Entalpía de alimentación	Velocidad de destilado	
Temperatura del reflujo	Velocidad de fondos	Composición del destilado
Entalpía del medio de calentamiento	Presión de la columna	Composición de fondos

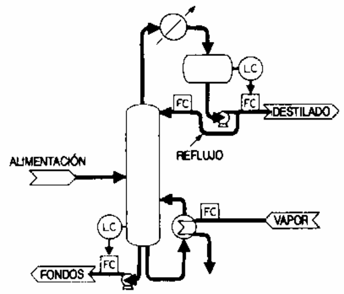


FIG. 22-170 Arreglo de control que promueve inestabilidad. No se ilustran los controles de presión.

separación especificada. Para lograr esto se requiere el establecimiento de la velocidad de flujo en un valor tal que se mantenga el balance de materiales. Posteriormente, se manipula el reflujo o el calor, a fin de regular la cantidad de energía que reside en el proceso.

En la figura 22-170 se muestra uno de los sistemas más comunes de control de columnas de destilación. Nótese que los productos de destilado y fondos se establecen a velocidades en las que es posible mantener un nivel en el acumulador de condensado y la base de la columna, respectivamente. Este arreglo de control promueve cierta inestabilidad, ya que las velocidades de flujo del destilado llegan a ser función de la cantidad de energía que se encuentra en el sistema. Las perturbaciones de energía ocasionadas por cambios en la alimentación, las entalpías del medio de calentamiento y la velocidad de flujo de la alimentación tendrán un efecto en la distribución de productos. Se llegan a tener grandes variaciones en la calidad de los productos para sistemas operados bajo este tipo de control, puesto que la calidad de los productos es muy sensible a la distribución de los mismos.

Cuando la columna se opera con perturbaciones, la recuperación es lenta porque el operador se ve obligado a manipular el reflujo y la energía suministrada de manera independiente, con objeto de tratar de cumplir los requisitos de calidad del producto. Esta situación crea complicaciones en la operación, si se tiene en cuenta que la cantidad de energía requerida para producir una separación determinada es función de muchas variables, cada una de las cuales debe ser considerada por el operador.

En la figura 22-171 se presentan dos sistemas básicos de control para columnas de destilación aceptables. Nótese que en cada sistema se manipulan las velocidades de flujo del destilado y el fondo de manera directa para producir la distribución requerida de productos (p. ej., control del balance de materiales). El reflujo es la variable manipulada para controlar la energía, cuando el producto de fondo se establece a

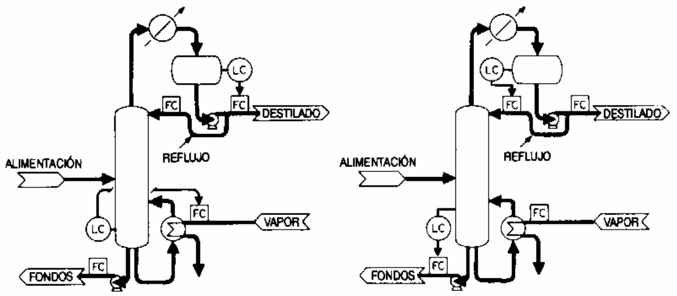


FIG. 22-171 Estabilidad de operación mejorada a través de la manipulación independiente de la energía.

partir del balance de materiales; de esta forma, el calor se manipula para controlar la energía cuando el destilado se establece con respecto al balance de materiales.

Los sistemas de control más preferidos tienden a ser autorregulables. Por ejemplo, las perturbaciones en la entalpía del medio de calentamiento se detectan mediante el controlador de nivel, que proporciona la compensación requerida cuando se manipula la corriente de fondo para tener un control en el balance de materiales. Las variaciones en la velocidad de la corriente en fase vapor de la parte superior de la columna, que son resultado de cambios en el reflujo subenfriado, se compensan de manera similar mediante el controlador de nivel del acumulador de condensado cuando el producto destilado se establece para el control del balance de materiales.

En un sistema de control como el referido aquí, el trabajo del operador se simplifica de manera sustancial ya que lo único que tiene que hacer es establecer el flujo de producto respecto al balance de materiales:

$$D = F(z - x^\circ)/(y^\circ - x^\circ) \qquad (22\text{-}39)$$

o

$$B = F(y^\circ - z)/(y - x^\circ)$$

donde D = velocidad de flujo del destilado, unidades de masa
F = velocidad de flujo de la alimentación, unidades de masa
z = concentración del componente ligero clave en la corriente de alimentación, porciento en peso
x° = concentración especificada del componente ligero clave en la corriente de fondo, porciento en peso
y° = pureza del producto especificada en la corriente de destilado, porciento en peso
B = velocidad de flujo de la corriente de fondo, unidades de masa

y después forzar el sistema para obtener la separación deseada a través de la manipulación del reflujo o el calor suministrado cuando se cuenta con una distribución de producto especificada con anterioridad. Los ajustes que debe realizar el operador son mínimos, ya que se reduce considerablemente el grado de interacción de las variables mediante el sistema de control adecuadamente dispuesto.

El producto más adecuado para la manipulación del sistema es aquel con la menor velocidad de flujo, si no existe otra razón que la exactitud; el mismo error relativo de medición producirá menos perturbaciones en el balance de materiales. Otras variables que pueden considerarse son la relación de reflujo y la dinámica del hervidor, sobre todo cuando se desea manipular el producto de fondo con métodos de balance de materiales.

Controles de la calidad del producto Controlar la calidad de los productos significa lograr el control de la concentración de impurezas en las corrientes de productos. Por ejemplo, considérese la operación usual de un desisobutanizador, que separa una mezcla de alimentación compuesta por propano, isobutano y butano en productos relativamente puros de isobutano (destilado) y butano (fondo). Si el objetivo de la destilación es obtener isobutano al 96%, la suma de impurezas de propano y butano normal no será superior a 4% en la corriente de destilado. La concentración del propano en la corriente de la parte superior de la columna no puede ser controlada por métodos directos y puede expresarse como

$$C_3D = C_3F/(D/F)$$

donde C_3D = propano en el producto destilado, porciento en peso
C_3F = propano en la alimentación, porciento en peso
D/F = razón destilado a alimentación, en peso

Esto significa que el butano es el componente que puede ser controlado como impureza en la corriente de destilado y, en este caso, la denominación que recibe es "componente pesado clave", mientras que el isobutano será el "componente ligero clave", ambos referidos al producto destilado; la concentración de la corriente de los fondos también se puede mantener en niveles específicos mediante sistemas de control adecuados.

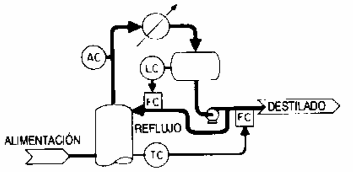


FIG. 22-172 El control de temperatura por plato, fuerza un balance interno de material al manipular la velocidad externa de flujo del material.

La medición de la calidad de los productos puede ser específica y no específica. Una medición específica de composición es aquella en la que los datos de calidad de la corriente se presentan directamente al observador (p. ej., porcentaje de concentraciones). Las mediciones no específicas de composición presentan datos que sirven para inferir la composición de la corriente inspeccionada al medir otras propiedades de la corriente.

La temperatura de los platos se ha utilizado a lo largo de muchos años como la principal indicación no específica de la calidad de productos obtenidos en la destilación. El control de temperatura se utiliza aún en muchas operaciones en las que la separación es binaria y la presión de la columna se mantiene constante. El control de temperatura de los platos proporciona un método confiable de bajo costo para controlar la calidad de los productos de destilación. En la figura 22-172 se ilustra cómo es posible incorporar el control de temperatura de platos al sistema básico de control presentado anteriormente. Obsérvese que el controlador de temperatura manipula la distribución de productos para corregir el balance de materiales; entonces, la respuesta concurrente (concomitante) del controlador de nivel fuerza a que la energía asuma el valor más adecuado.

El sensor de temperatura debe localizarse en un punto en la columna que exhiba una variación significativa de temperatura cuando cambia la composición del plato. En un sistema ideal, este sensor debe ubicarse en la trayectoria de ascenso del vapor hasta el plato seleccionado. Esta colocación asegura una rápida respuesta a la variación de temperaturas.

Otras indicaciones no específicas de la calidad del producto, consideran propiedades como densidad, viscosidad, índice de refracción y punto de ebullición. Todas estas propiedades han sido utilizadas con diversos grados de éxito en el control de la composición.

Las mediciones de la calidad del producto específico incluyen el empleo de espectrómetros de masa y cromatógrafos de gases, de los cuales el último es el más utilizado en años recientes. Cuando se utiliza el análisis cromatográfico diseñado, instalado y mantenido adecuadamente, se han obtenido resultados excelentes.

El diseño e instalación de sistemas de muestreo es tal vez el aspecto más importante de la cromatografía de gases. El sistema de muestreo debe ser de tal calidad que sea capaz de proporcionar al analizador una muestra representativa de la corriente rastreada en el menor tiempo posible. Esto significa que la muestra debe extraerse en un punto corriente arriba de dichos elementos que producen retrasos en la operación, como el acumulador de condensado y el hervidor.

La retroalimentación al controlador-analizador se introduce de manera similar a la descrita para el control de temperatura y en la figura

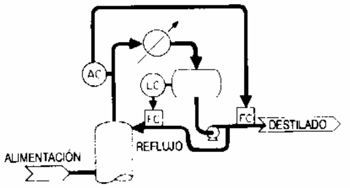


FIG. 22-173 Un controlador-analizador proporciona una respuesta correctiva a los cambios en la concentración del componente pesado clave en la parte superior de la columna.

22-173 se ilustra cómo puede adicionarse el control de composición a los sistemas básicos de control.

Controles de entrada de calor Las variaciones en el calor suministrado para la destilación crean inestabilidad puesto que se ocasionan variaciones en las velocidades internas de flujo de líquido y vapor. Por ejemplo, las variaciones en la temperatura del reflujo afectan el flujo interno de líquido descendente. Un método que ha demostrado su eficacia en la eliminación de estas perturbaciones consiste en incorporar a la columna un controlador de reflujo interno de propósito especial; el objetivo es mantener el flujo de líquido descendente desde el plato superior a una velocidad específica. La siguiente ecuación de control se deriva de los balances de material y energía en estado estacionario alrededor del plato superior:

$$R_i = R_e\,[1. + K''\,(T_{ov} - T_{re})]$$

donde R_i = velocidad de reflujo interno, unidades de masa
R_e = velocidad de reflujo externo, unidades de masa
K = constante de reflujo interno, C_p/H, donde C_p = calor específico de líquido en el plato superior y H = calor de vaporización del líquido en el plato superior
T_{ov} = temperatura del vapor en la parte superior de la columna
T_{re} = temperatura de la corriente de reflujo externo

En las figuras 22-174*a* y *b* se ilustran dos métodos por los cuales se puede utilizar esta ecuación.

Otra perturbación en el calor suministrado a la columna la causan las variaciones en la entalpía del medio de calentamiento. Son comunes las ondas o variaciones de presión en los sistemas de suministro de vapor y las variaciones en la calidad del vapor, pudiendo ocasionar trastornos en la operación de destilación. La ecuación de control es

$$H = (a_0 + a_1{}^\circ P_s + a_2{}^\circ T_s) - (a_3 + a_4{}^\circ T_r)$$

donde H = vapor al hervidor, ΔH
$a_0, a_1, \ldots$ = constantes de la ecuación de regresión
P_s = presión del vapor suministrado al hervidor
T_s = temperatura del vapor suministrado al hervidor
T_r = temperatura de referencia

El resultado de esta ecuación se utiliza en un sistema de control que establece la velocidad del medio de calentamiento en forma compensada para estas perturbaciones.

Las perturbaciones en la entalpía de la alimentación son graves por la misma razón que las que ocurren en el calor suministrado. Los efectos de las perturbaciones provocadas por variaciones en la entalpía de alimentación pueden minimizarse mediante la incorporación de las técnicas de control analizadas en la subsección "Control de intercambiadores de calor."

Control predictivo Un sistema de control predictivo dará respuesta a cambios en las variables independientes clave antes de que estos cambios afecten de manera notable el proceso. Un sistema de control predictivo para destilación alterará los balances de materiales y energía hasta el punto en que se requiera, con objeto de mantener la separación especificada en presencia de variaciones en la velocidad de alimentación, composiciones, temperatura, eficiencia de los platos y otras variables, para las que la separación es sensible. El sistema de control predictivo para destilación es una extensión de los sistemas básicos de control expuestos con anterioridad, ya que manipula en forma independiente la extracción de producto y el suministro de energía para producir las separaciones especificadas. El producto se extrae de acuerdo con el siguiente balance de material

$$D = F_{ret}\,(z - x^\circ)/(y^\circ - x) \qquad \text{o}$$
$$B = F_{ret}\,(y^\circ - z)/(y^\circ - x)$$

donde F_{ret} = velocidad de la alimentación retrasada, unidades de masa. La señal de la velocidad de alimentación se retrasa y esto ocasiona cambios en la ecuación de control con el consiguiente efecto en la variable manipulada (*D* o *B*) en el tiempo adecuado; por ejemplo, existirá una leve transición de una etapa de operación a la próxima. Esta compensación dinámica se encuentra por lo general en forma de tiempo muerto más un retraso de primer o segundo orden.

Los valores predichos para el reflujo y el calor casi nunca se alcanzan, por lo que es necesario desarrollar ecuaciones de operación para cada caso. Las etapas incluidas en el desarrollo de cada ecuación son las siguientes: 1) simulación de la operación de un caso base, 2) estudio de sensibilidad, 3) análisis de las perturbaciones de las variables independientes, y 4) datos de una curva de ajuste para la ecuación supuesta.

A continuación se presenta un ejemplo de ecuación que es generado por esta técnica:

$$R_i/F = (a_1 + b_1/(c_1 + E))^\circ(a_2 + (b_2/(c_2 + (100 - y^\circ))))^\circ \ldots (a_3 + b_3/(c_3 + x^\circ)))^\circ(a_4 + (a_5{}^\circ T_f) + (a_6{}^\circ LKF) + \ldots (a_7{}^\circ HKF) + (a_8{}^\circ P_c)) \qquad (22\text{-}40)$$

donde R_i/F = razón en peso, reflujo interno a alimentación
$b_1, b_2, \ldots b_n$ = constantes de la ecuación de regresión
$c_1, c_2, \ldots C_n$ = constantes de la ecuación de regresión
E = eficiencia de separación, porciento
LKF = concentración del componente ligero clave en la alimentación, porciento en peso
HKF = concentración del componente pesado clave en la alimentación, porciento en peso

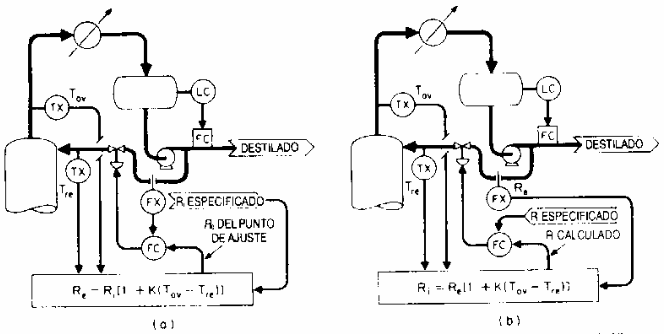


FIG. 22-174 *a*) El computador de reflujo interno calcula el punto de ajuste del controlador de reflujo externo. *b*) El computador de reflujo interno calcula la velocidad de reflujo interno actual.

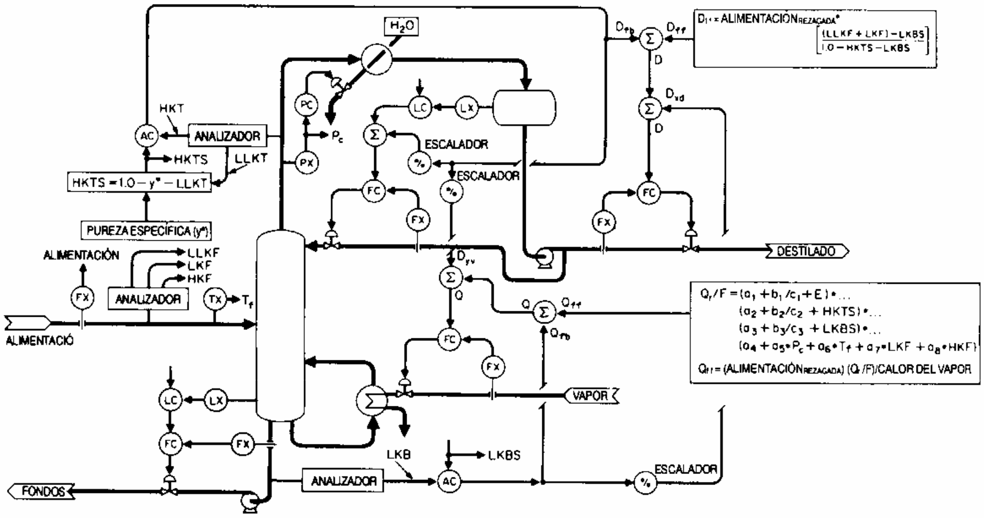


FIG. 22-175 Los controles básicos son auxiliados por circuitos predictivo y de análisis. Nótese que la red no está acoplada.

TABLA 22-12 Nomenclatura para la figura 22-175

Símbolo	Explicación
D_{fb}	Contribución del control de retroalimentación al punto de ajuste del flujo de destilado
D_{ff}	Contribución del control predictivo
D_{xd}	Contribución del desacoplador no interactivo al punto de ajuste del flujo de destilado
D_{yc}	Contribución del desacoplador no interactivo al punto de ajuste del calor al hervidor
HKF	Componente pesado clave en la corriente de alimentación
HKT	Concentración del componente pesado clave en la corriente de la parte superior de la torre, porciento en peso
HKTS	Concentración especificada del componente pesado clave en el producto destilado, porciento en peso
LKBS, x^*	Concentración especificada del componente ligero clave a la corriente de fondo, porciento en peso
LKF, z	Concentración del componente ligero clave en la corriente de alimentación, porciento en peso
LLKF	Concentración del componente más ligero que el componente ligero clave en la corriente de alimentación, porciento en peso
LLKT	Concentración del componente más ligero que el componente ligero clave en la corriente de producto en la parte superior de la torre, porciento en peso
Q	Calor al hervidor, BTU/unidad de tiempo
Q_{fb}	Contribución del control de retroalimentación al punto de ajuste del flujo de vapor
Q_{ff}	Contribución del control predictivo al punto de ajuste del flujo de vapor
Q_r/F	Razón en peso, calor del hervidor a la alimentación
x^*, *LKBS*	Concentración especificada del componente ligero clave en el producto de fondos, porciento en peso
z, *LKF*	Concentración del componente ligero clave en la corriente de alimentación, porciento en peso

La velocidad del reflujo requerido para satisfacer R_i/F, se calcula entonces de acuerdo con la siguiente relación:

$$R_e = (F_{\text{rezagada}} \,^{*} R_i/F)/[1. + K^{*}(T_{ov} - T_{re})]$$

El punto de ajuste del reflujo externo se mantiene en el valor R_e.

Nótese que la forma de la ecuación de calor de operación para la predicción de Q/F (calor en el hervidor a alimentación) es básicamente la misma que la establecida en la ecuación (22-40).

Los límites absoluto y de velocidad de cambio deberán establecerse en las salidas de todas las ecuaciones del control predictivo. Estos límites protegerán la operación de los trastornos creados por fallas en los equipos que suministran entradas a las ecuaciones.

La exactitud de la predicción depende de la exactitud de los datos proporcionados para el manejo de la ecuación; como se supone que no se obtiene una exactitud absoluta, es necesario un control de retroalimentación. Las técnicas mencionadas antes pueden aplicarse a este caso.

En la figura 22-175 se ilustra un sistema computarizado de control para una columna de destilación en la que los controles básicos son apoyados por controles predictivos, de calidad del producto y suministro de calor. En la tabla 22-12 se explican los símbolos empleados en la figura 22-175, que no se habían definido hasta este punto.

CONTROL DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DE UN REACTOR QUÍMICO

El control de la velocidad o volumen de producción de una reacción exotérmica en un reactor agitado es un ejemplo del empleo del control por computadora basándose en una variable computada. El volumen de producción se determina mediante la computación en línea de un balance de calor dinámico, para utilizarse como variable controlada del proceso [Tolin y Fluegel, *J. Intrum. Soc. Am.*, **6**, 32-38 (octubre, 1959).]

Sistema de un reactor usual En la figura 22-176 se ilustra un esquema que representa un reactor usual, con ciertas simplificaciones. El disolvente, el reactivo y el catalizador se pueden considerar como entradas continuas al depósito agitado. El reactivo y el producto se disuelven en el disolvente. El refrigerante que se hace circular por las bobinas de enfriamiento y la cubierta del reactor conserva la temperatura del mismo.

La velocidad de producción del producto es proporcional al calor generado por la reacción, y se controla mediante el ajuste de la velocidad del catalizador. El calor que genera la reacción se calcula ejecutando un balance de calor, en línea alrededor del reactor. La información

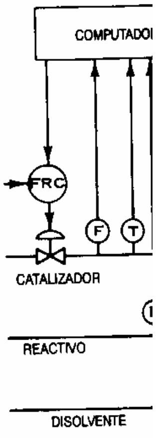


FIG. 22-176 Control

requerida para este
incluye las temperat
entrada, el flujo y l
reactor, la energía
reactivo en el disolv

Balance de calo
calor se pueden esc
referencia, de modo
masa del efluente d
simplificar los cálc
flujo de masa. Tam
rriente es constante
El balance global d
calor indicadas en l

$Q_s + Q_m$ ·

Por lo tanto, PR =

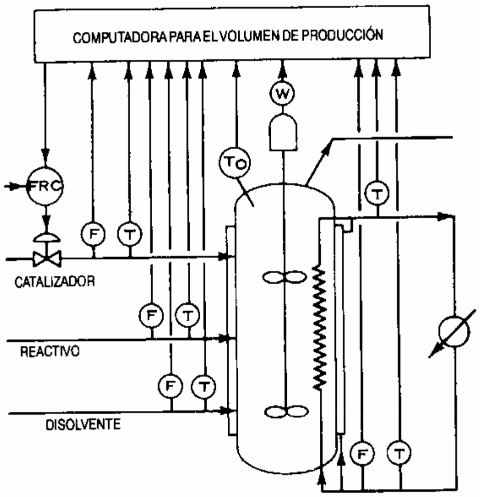


FIG. 22-176 Control del volumen de producción en un reactor químico.

requerida para este tipo de computación de balance de calor en línea incluye las temperaturas y los flujos de masa de todas las corrientes de entrada, el flujo y la temperatura del refrigerante, la temperatura del reactor, la energía agregada por el agitador, el calor de solución del reactivo en el disolvente y el calor de reacción.

Balance de calor del reactor Las ecuaciones para el balance de calor se pueden escribir con la temperatura del reactor tomada como referencia, de modo que no se requiera el cálculo dinámico del flujo de masa del efluente del reactor y la eliminación de calor resultante. Para simplificar los cálculos del ejemplo se supondrán las mediciones del flujo de masa. También se supone que el calor específico de cada corriente es constante en el intervalo de temperaturas que se encuentra. El balance global de calor, basado en las entradas y eliminaciones de calor indicadas en la tabla 22-13, es:

$$Q_s + Q_m + Q_c + Q_w + Q_r + Q_a + Q_L + Q_p = 0$$

Por lo tanto, $PR = -(1/h_p)(Q_s + Q_m + Q_c + Q_w + Q_r + Q_a + Q_L)$

TABLA 22-13 Entrada y eliminación de calor de un reactor químico

Fuente	Ecuación	Variables	
Solvente	$Q_s = F_s C_{ps}(T_s - T_o)$	$T_o =$	temp. del reactor
		$Q_s =$	entrada de cal. del disolvente
		$F_s =$	flujo de masa del disolvente
		$C_{ps} =$	calor específ. del disolvente
		$T_s =$	temp. del disolvente
Reactivo	$Q_m = F_m C_{pm}(T_m - T_o) + F_m h$	$Q_m =$	entrada de cal. del reactivo
		$F_m =$	flujo de masa del reactivo
		$C_{pm} =$	calor específ. del reactivo
		$T_m =$	temp. del reactivo
		$h =$	calor de soluc. del reactivo
Catalizador	$Q_c = F_c C_{pc}(T_c - T_o)$	$Q_c =$	entrada de calor del cataliz.
		$F_c =$	flujo de masa del cataliz.
		$C_{pc} =$	calor especif. del cataliz.
		$T_c =$	temp. del catalizador
Mezclador	$Q_w = K(W - W_o)$	$Q_w =$	entrada de calor del mezcl.
		$K =$	conversión de pot. caloríf.
		$W =$	potencia del mezclador
		$W_o =$	potencia del mezcl. sin carga
Refrigerante	$Q_r = F_r C_{pr}(T_r - T_i)$	$-Q_r =$	eliminación de calor de refrig.
		$F_r =$	flujo de masa del refrigeran.
		$C_{pr} =$	calor específico del refrigeran.
		$T_r =$	temp. de salida del refrigeran.
		$T_i =$	temp. de entrada del refrig.
Reactor	$Q_a = M_a C_a \dfrac{dT_o}{dt}$	$Q_a =$	acumulación de calor en el reactor
		$M_a =$	masa de reactor y su cont.
		$C_a =$	capacidad caloríf., reactor y cont.
Ambiente	$Q_L = f(T_L, V_L)$	$-Q_L =$	pérdida de calor al ambiente
		$f(T_L, V_L) =$	función de la temp. ambiente y la vel. del viento
Reacción	$Q_p = PRh_p$	$PR =$	velocidad de generación de prod.
		$Q_p =$	entrada del calor de reacción
		$h_p =$	calor de reacción

h_p y todos los términos de las ecuaciones para los valores de Q, que constituyen la ecuación funcional para PR, son conocidos, o bien, se pueden computar automáticamente a partir de mediciones de proceso en línea.

El valor computado de PR se utiliza, entonces, como la medición de la variable controlada para el control automático de la adición de catalizador, como se muestra en la figura 22-176. En el sistema de reacción real del que se tomó este ejemplo, el catalizador tiene un tiempo de inducción, que es una fracción importante de su tiempo de residencia en el reactor. Por consiguiente, la compensación de tiempo muerto, como se ilustra en la figura 22-55, es un elemento necesario para cualquier rendimiento razonable de controlador.

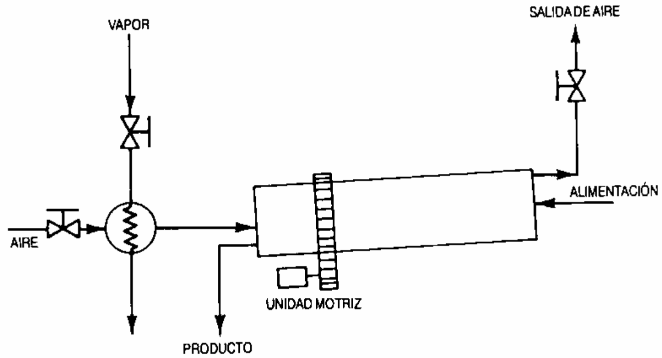


FIG. 22-177 Diagrama esquemático simplificado de un secador rotatorio.

CONTROL DE OPERACIONES DE SECADO

Con frecuencia, el control de las operaciones de secado presenta problemas debido a que es difícil efectuar mediciones directas en línea de la calidad del producto o de la eficacia del secado. Por tanto, el proceso de secado se debe controlar partiendo de mediciones de las condiciones ambientales y cambiando éstas cuando un análisis fuera de línea o de laboratorio indique tal necesidad. Si es factible realizar una medición directa de la calidad del material de entrada, conviene contar con un sistema de control predictivo.

Hay muchas clases de secadores de sólidos que tienen una variedad de problemas de medición y control de diferente índole. Aunque las configuraciones mecánicas son distintas, los problemas de control básicos son esencialmente los mismos para secadores rotatorios, de pantalla en movimiento, lecho fluidificado, cubierta en movimiento, bandeja y de transportador de malla.

Secadores rotatorios El secador rotatorio a contracorriente, que se muestra en la figura 22-177, es la forma básica de esta clase de secadores. Este aparato consiste en una cubierta cilíndrica inclinada, con un montaje de hojas para mezclar que gira en torno al eje longitudinal. El material húmedo penetra en el extremo elevado y se mezcla con aire caliente durante su desplazamiento a lo largo del cilindro. En este ejemplo, el aire caliente, que fluye a contracorriente en relación con el material que se está secando, se calienta por medio de un intercambiador de calor calentado por vapor. La velocidad de flujo del aire se regula mediante un amortiguador y se utiliza otro amortiguador secundario en la salida del aire de expulsión, con el fin de regular la presión dentro del secador. Para este estudio, se supondrá que la velocidad del motor es fija y que la condición y la velocidad de alimentación se determina por la operación unitaria que precede al secador.

Variables del secador Las variables independientes de entrada para el secador rotatorio se dividen en dos clases: las no controladas y las reguladas. Las entradas no controladas incluyen el contenido de humedad y la velocidad de la alimentación. Las entradas independientes reguladas son variables que se ajustan para controlar el proceso de desecación. Estas variables incluyen el calor aplicado, la entrada de aire y la posición del amortiguador en la salida.

Las variables dependientes de salida del secador rotatorio y el calentador de aire incluyen la presión del secador, la temperatura del aire de entrada del secador y las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco del aire de salida; no obstante, la variable de salida primaria, que generalmente no se puede medir por medio de aparatos automáticos, es el contenido de humedad del producto. El contenido de humedad del producto se determina a veces en línea en forma indirecta, midiendo la temperatura del producto, pero, a menudo, esta medición es poco segura.

Sistema de control El sistema de control normal para un secador rotatorio utiliza el calor aplicado para regular la temperatura del aire de entrada; la presión en un punto se controla mediante el ajuste del amortiguador de salida, y la velocidad del aire de entrada sirve para regular la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida. Un método un poco distinto emplea la velocidad del aire para controlar la diferencia entre la temperatura de salida de bulbo seco y la de bulbo húmedo, empleando esta diferencia de temperatura como una medida de la velocidad de evaporación. Esta última modificación en la configuración del control se ilustra en la figura 22-178. Otra modificación más consiste en controlar la medición de la alimentación en respuesta a la temperatura de salida, o realizar la medición para mantener constante la alimentación.

Control predictivo Se puede lograr un mejor control de una operación de desecación si se dispone de mediciones más pertinentes. Por ejemplo, se puede aplicar un sistema de control predictivo al secador ilustrado en la figura 22-179 cuando la carga sea mensurable. La alimentación es un polvo seco que se mezcla con agua y un aglutinante para formar gránulos. El agua se agrega en proporción con la velocidad de alimentación del polvo, de manera que el contenido de humedad de la alimentación del secador es razonablemente constante. Se emplean dos conjuntos de quemadores para aplicar calor a la cubierta rotatoria.

El objetivo del control es mantener la temperatura final del producto dentro de límites especificados superiores al punto de ebullición del agua. El control de retroalimentación de esta temperatura, que maneja en forma simultánea la velocidad del gas combustible a ambos conjuntos de quemadores para compensar variaciones en la velocidad de alimentación, presenta muchos problemas. La respuesta de la temperatura del proceso a los cambios de alimentación incluye un tiempo muerto prolongado, y la relación de estado estacionario entre la inyección de agua y la velocidad del gas combustible es de un tipo marcadamente no lineal.

Una solución consiste en medir las perturbaciones de la alimentación recibida y comenzar a ajustar la velocidad del combustible gaseoso antes

de que las perturba
como se observa e
predictivo utiliza l
ajustes en la veloc
hornos en los tiem
ción de la temperat
de alimentación di
velocidades del ga
trolador normal uti
ra compensar la se
tener la temperatu
deseados.

Secadores de ta
también de las med
muestra en la figur
torio y la aliment
material se seca d
medio de una cuch

El funcionami
ajustando la vel
variables que se
calidad del prod
contenido de hu

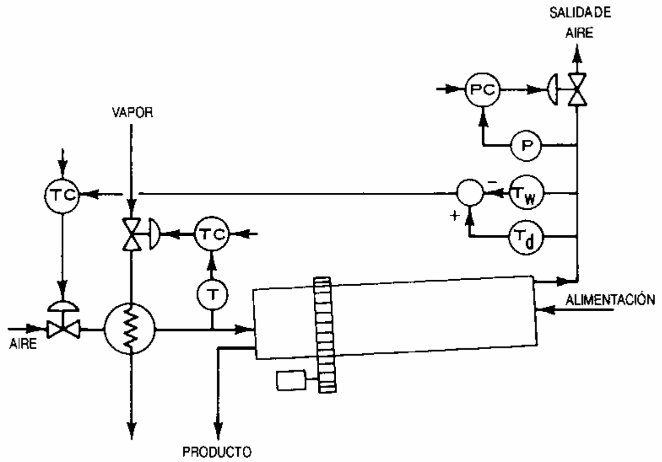


FIG. 22-178 Configuración del control de un secador rotatorio.

imaria, que general-
tomáticos, es el con-
e humedad del pro-
lirecta, midiendo la
a medición es poco

nal para un secador
temperatura del aire
ediante el ajuste del
e entrada sirve para
le salida. Un método
ra controlar la dife-
co y la de bulbo hú-
a como una medida
lificación en la con-
178. Otra modifica-
alimentación en res-
lición para mantener

control de una ope-
es más pertinentes.
ontrol predictivo al
carga sea mensura-
ezcla con agua y un
rega en proporción
nanera que el conte-
es razonablemente
adores para aplicar

ura final del produc-
punto de ebullición
ta temperatura, que
s combustible a am-
riaciones en la velo-
nas. La respuesta de
entación incluye un
lo estacionario entre
ustible es de un tipo

es de la alimentación
ustible gaseoso antes

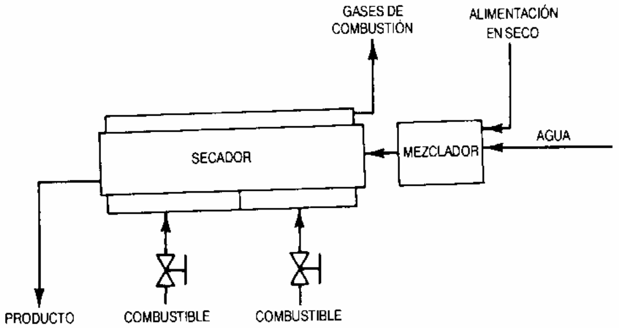


FIG. 22-179 Granulador con mezclador y secador, con una entrada mensurable de agua y aglutinante.

de que las perturbaciones afecten la temperatura final del producto, como se observa en la figura 22-180. Este tipo de sistema de control predictivo utiliza la velocidad medida del agua inyectada para hacer ajustes en la velocidad del gas combustible suministrado a los dos hornos en los tiempos apropiados, con el fin de minimizar la variación de la temperatura del producto. La porción dinámica del control de alimentación directa es esencialmente de tiempo muerto, y las dos velocidades del gas combustible se cambian en secuencia. Un controlador normal utiliza una medición de temperatura del producto para compensar la señal de control predictivo, con el propósito de mantener la temperatura del producto dentro de los límites de operación deseados.

Secadores de tambor El control de un secador de tambor depende también de las mediciones disponibles. En el secador de tambor que se muestra en la figura 22-181, se aplica calor al interior del tambor giratorio y la alimentación húmeda se adhiere al exterior del mismo. El material se seca durante parte de una revolución y se desprende por medio de una cuchilla o un raspador.

El funcionamiento del secador de tambor se puede controlar ajustando la velocidad del mismo y el calor suministrado. Las variables que se deben controlar dependen de las mediciones de calidad del producto de que se disponga, como, por ejemplo, contenido de humedad o temperatura del producto. En la figura 22-181 se ilustra el control de la velocidad de vapor basada en una medición continua del contenido de humedad. La velocidad del tambor es casi siempre fija.

Secadores de rocío Las mezclas líquidas se secan a menudo rociando el material dentro de una corriente de gases calientes. Las pequeñas gotitas ofrecen una gran área de superficie expuesta, de modo que la desecación es rápida. El breve tiempo muerto de proceso, que se tiene debido a la rápida desecación, permite a menudo asegurar un buen control automático.

En la figura 22-182 se presenta una configuración de control común para un secador de rocío. La temperatura del aire de entrada se mantiene mediante la regulación automática del índice de calor. La medición de la temperatura del aire de salida sirve para ajustar la velocidad de la alimentación del secador.

CONTROL DE OPERACIONES POR LOTES O DE ARRANQUE Y DETENCIÓN

Muchas operaciones de proceso se pueden clasificar como de arranque y detención. Además de los procesos por lotes, la puesta en marcha y la suspensión de una operación unitaria normalmente continua requiere técnicas de control para procesos por lotes. Del mismo modo, el cambio de

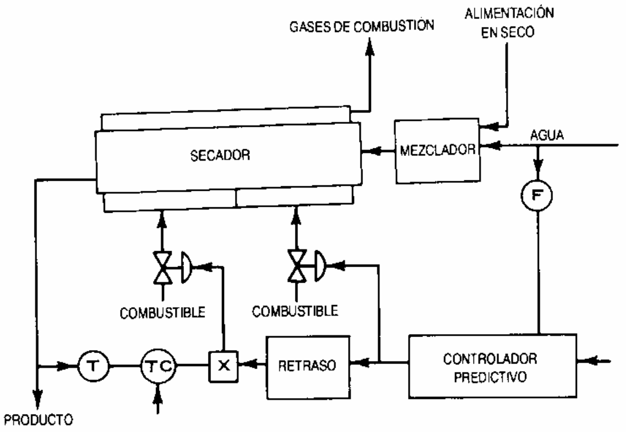


FIG. 22-180 Control predictivo de un granulador con mezclador y secador.

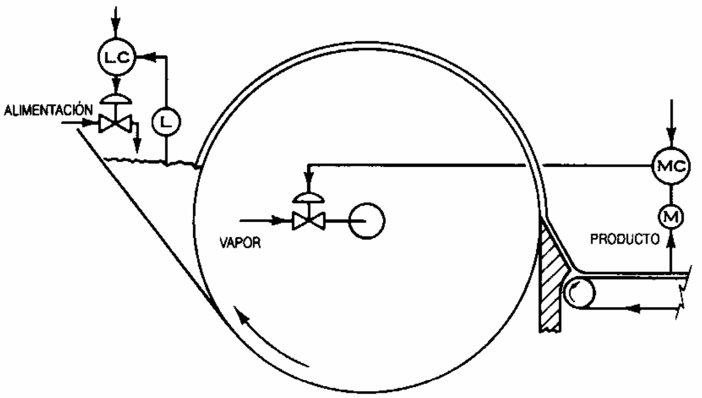


FIG. 22-181 Sistema usual de control para un secador de tambor que utiliza la medición de humedad y el controlador para ejercer el control de la calidad del producto.

un proceso continuo de un nivel de operación de estado estacionario a otro puede ser similar al procesamiento por lotes. El control automático de procesos por lotes o de arranque y detención puede ser difícil, debido a los cambios rápidos registrados en las condiciones de operación. Con frecuencia se utilizan sistemas de control por computadora para mejorar el control de una operación de proceso de arranque y detención.

Es probable que se requieran procedimientos de control especiales para manejar los cambios amplios en las condiciones de operación, por ejemplo, en un reactor por lotes. La operación puede incluir la carga del reactor con reactivos y catalizador, la aplicación del calor necesario para llegar a la temperatura de la reacción, el mantenimiento de un nivel de operación deseado hasta que la reacción llega a la etapa conveniente de determinación, la suspensión de la reacción, la separación del producto y la preparación del reactor para otro lote. En el control de desecación por lotes y destilación se presentan problemas similares a estos.

Criterios para la eficiencia de arranque y detención Los criterios de eficiencia para operaciones de arranque y detención se especifican de varias maneras. Este tipo de operaciones se evalúa con frecuencia de acuerdo con el tiempo necesario para completar un cambio de proceso sin sobrepasar las restricciones de procesamiento durante el cambio. Por ejemplo, un secador por lotes puede funcionar de tal modo que obtenga un contenido específico de humedad de producto en un tiempo mínimo, sin exceder una temperatura máxima del secador preestablecida.

Otro criterio común para la eficiencia o rendimiento del control consiste en completar la operación requerida a un costo mínimo. Un ejemplo de ello es el reactor por lotes, en que se produce una cantidad determinada de producto a un costo mínimo de calentamiento, material y catalizador, sin especificar un límite para el tiempo requerido.

Un proceso por lotes puede operar también de tal suerte que se obtenga el máximo rendimiento dentro de un periodo determinado, en donde la restricción del tiempo se establece en función de la velocidad a la que se genera el producto o la velocidad con que se dispone la materia prima. Un tiempo de lote más corto que el máximo puede no representar ningún beneficio si la frecuencia de la operación se determina según las circunstancias que prevalecen fuera del proceso.

El criterio de control puede hacer también que el proceso siga una trayectoria específica durante un cambio en la operación. Por ejemplo,

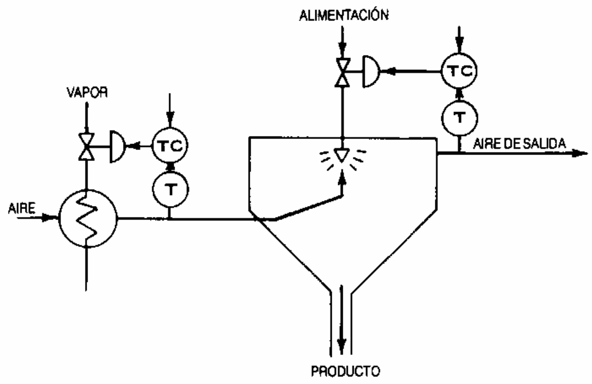


FIG. 22-182 Sistema usual de control para un secador de rocío.

se puede hacer que
ratura predetermina
ria preestablecida
tiempo o costo míni
Arranque de p
dustriales, el arran
tiene un atractivo
ración sea particu
proceso ponga con
lente al arranque,
tención (*start-sto*
para minimizar l
cuantas operacion
grar un arranque a
arranque se ha to
de control, el tiem
mo con muy poco
Reactor de polim
trado en la figura 2
se requiere cierta a
temperatura adecu
trum. Soc. Am., **8(**
temperaturas de ali

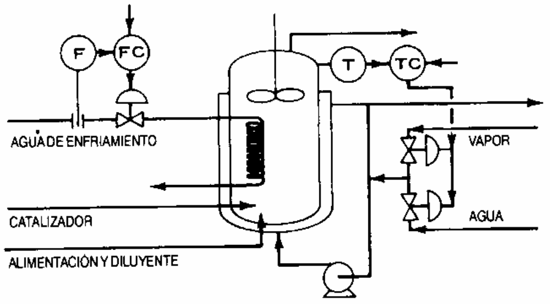


FIG. 22-183 Sistema usual de control de temperatura para un reactor de polimerización exotérmica que requiere poca atención del operador durante el arranque.

se puede hacer que un reactor por lotes siga una trayectoria de temperatura predeterminada durante el arranque y la detención. La trayectoria preestablecida se diseña normalmente como una operación de tiempo o costo mínimos.

Arranque de procesos continuos En muchos procesos industriales, el arranque automático de una operación continua no tiene un atractivo económico importante a menos que dicha operación sea particularmente difícil, o que alguna condición del proceso ponga con frecuencia al mismo en una situación equivalente al arranque, que hayan ciclos frecuentes de arranque y detención (*start-stop*), o que el sistema de control se haya diseñado para minimizar los problemas de arranque. Hoy existen unas cuantas operaciones unitarias que se han automatizado para lograr un arranque a nivel óptimo. Sin embargo, si el problema de arranque se ha tomado en cuenta durante el diseño del sistema de control, el tiempo de iniciación puede acercarse al nivel óptimo con muy poco control automático.

Reactor de polimerización exotérmica El sistema de control ilustrado en la figura 22-183 utiliza un mínimo de instrumentación y sólo se requiere cierta atención del operador para lograr el control de la temperatura adecuada durante el arranque. [Mayer y Spencer, *J. Instrum. Soc. Am.*, **8**(7), 58-64 (1961).] La reacción es exotérmica y las temperaturas de alimentación son inferiores a la del reactor. El procedimiento de arranque requiere que haya diluyente dentro del reactor y que esté a la temperatura de reacción antes de añadir la alimentación de reactivo y el catalizador. Antes de iniciar la reacción, el calor se elimina por medio de un serpentín, y la misma cantidad de calor se suministra a través de la cubierta, con el fin de mantener constante la temperatura del reactor. Conforme se introduce la alimentación fría de reactivo y diluyente y el catalizador, la temperatura comienza a descender y se aplica automáticamente una cantidad mayor de calor para hacer que la alimentación recibida llegue a la temperatura de reacción. Al aumentar la velocidad de reacción se requerirá menos calor cada vez y, finalmente, la cubierta comenzará a eliminarlo. Durante el tiempo en que el reactor opera para llegar a la velocidad completa de producción, el sistema de control hace ajustes continuamente para mantener la temperatura del mismo en el punto de ajuste.

El arranque del reactor que se ilustra en la figura 22-176 requiere condiciones algo similares. En este caso, el reactor se llena completamente con líquido y se somete a presión antes de calentarlo. Si la velocidad de separación de fluido del reactor se restringe, la velocidad de calentamiento debe limitarse para evitar que la presión del reactor ascienda debido a la expansión del fluido.

Arranque de una columna de destilación El arranque y la detención de las columnas de destilación constituyen un proble-

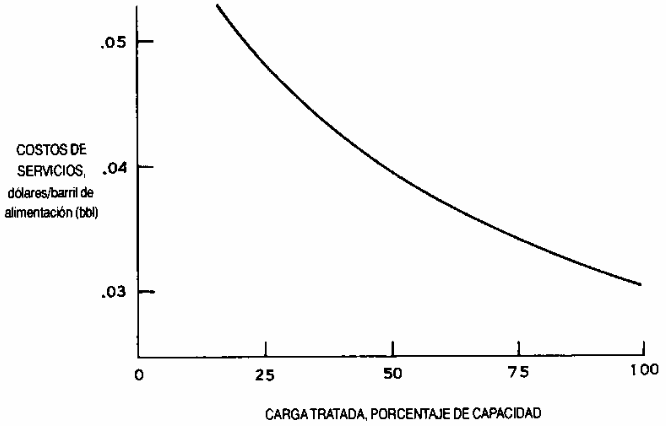


FIG. 22-184 Costos de servicios de una columna de destilación con una pureza constante de producto.

ma de control muy común. El control automático del arranque de una columna da con frecuencia beneficios económicos sobresalientes en el funcionamiento de la misma, sólo a una capacidad plena, cuando se logra la máxima eficiencia de bandeja. Si se dispone de una capacidad de almacenamiento de alimentación para situaciones de alimentación restringida, un sistema de arranque y detención de tipo automático permitirá una operación tipo encendido-apagado (*on-off*) que sea más eficiente que la operación continua, a una carga tratada baja.

En la figura 22-184 se ilustra la variación en los costos de servicios en función de las cargas tratadas para una columna de destilación típica que opera a composiciones de producto fijas. Si la columna opera en forma continua a una carga parcial, los costos de operación pueden ser superiores que cuando funciona parte del tiempo a carga plena. En las condiciones de carga plena, los costos de procesamiento incluyen los costos de servicios, además de los de arranque, detención y almacenamiento. Por tanto, se obtendrán muchas ventajas si se cuenta con un sistema eficiente de control de arranque automático.

Un sistema de arranque controlado por computadora para una columna de destilación tiene más o menos la misma complejidad que el hecho de poner un reactor químico en línea. La rutina de arranque es una secuencia automática de las tareas que ejecuta normalmente un operador. Puede ser una subrutina en un sistema de control por computadora para varias columnas. El objetivo del programa es alcanzar el nivel de operación deseado dentro de un tiempo razonable y a un costo mínimo.

Control de reactores por lotes El control de un reactor por lotes o intermitente en un caso sencillo, consiste en cargar el reactor, controlar la temperatura del mismo para satisfacer algún criterio de procesamiento, apagar y vaciar el reactor. Para una reacción exotérmica, es probable que se necesite calor para obtener la temperatura de reacción deseada y luego se utiliza enfriamiento para mantener la temperatura de reacción adecuada.

El empleo de instrumentación estándar para controlar un reactor por lotes requiere, por lo común, una atención minuciosa del operador. Por ejemplo, éste debe ajustar en forma manual las corrientes para cargar el reactor y luego ajustar los controles de temperatura para obtener la temperatura de reacción deseada. Esta forma escalonada muy por debajo de la velocidad máxima.

Programación por lotes Una técnica para reducir la atención que se requiere del operador, consiste en emplear un programador por lotes, un mecanismo que avanza automáticamente el lote a través de sus etapas de proceso, obedeciendo a un programa de tiempo preseleccionado. Para asegurar la terminación completa de cada etapa de operación, las secuencias de tiempo se hacen normalmente un poco más prolongadas que lo necesario.

Programador de punto final Se logra reducir el tiempo de cada lote cuando se utiliza un programador de punto final que emplea alguna medición del rendimiento del proceso para activar la siguiente secuencia de operación. Por ejemplo, en un proceso de esterificación, los valores limitantes de temperatura y presión sirven para formular la secuencia de las diferentes etapas del proceso por lotes, en la medida que los puntos finales utilizados describan los productos obtenidos, el programador de punto final reducirá el tiempo de procesamiento en comparación con el programador de tiempo fijo. Cuando se llega a un punto final deseado, el procesamiento ejecuta una conmutación al siguiente paso sin pérdida de tiempo y, por ende, la producción se incrementa.

Control por computadora El control por computadora se utiliza a veces en reactores por lotes, derivando ciertas ventajas. La cantidad de reactivos cargada se regula con mucha precisión para asegurar la mezcla adecuada. Los controles de temperatura se programan previamente para obtener un tiempo mínimo para sus lapsos transitorios. Si se cuenta con reguladores computarizados, el controlador se ajusta en forma automática para mantener una sintonía o ajuste adecuado del controlador en todos los niveles de operación. En la figura 22-185 se ilustra un ejemplo de diagrama de flujo de la acción del operador. Este diagrama de flujo puede servir también como guía para un programa de computadora que regule un reactor por lotes.

Adición del reactivo En algunas ocasiones, una cantidad pequeña de automatización del reactor por lotes genera un mejoramiento sustancial de la carga tratada, si se dispone de una información más completa concerniente a las condiciones de reacción y las limitaciones del equipo. Véase la figura 22-186, correspondiente a un reactor por lotes, en el cual se desarrolla una reacción exotérmica e irreversible de la alimentación *Y*, para formar el producto *Z*, en presencia de un catalizador. [Schrock, *J. Instrum. Soc. Am.*, **12**, 75-82 (octubre 1965).] Se considera que un lote queda completo cuando se ha agregado una cantidad fija de *Y* y la reacción se acerca al equilibrio. Un totalizador integra la velocidad de adición de *Y*, y al llegar a un total predeterminado dicha adición se suspende. Para el arranque, se agrega al reactor vacío un pequeño lote iniciador incluyendo al catalizador; el iniciador se hace llegar a la temperatura de operación y el reactor se somete a presión

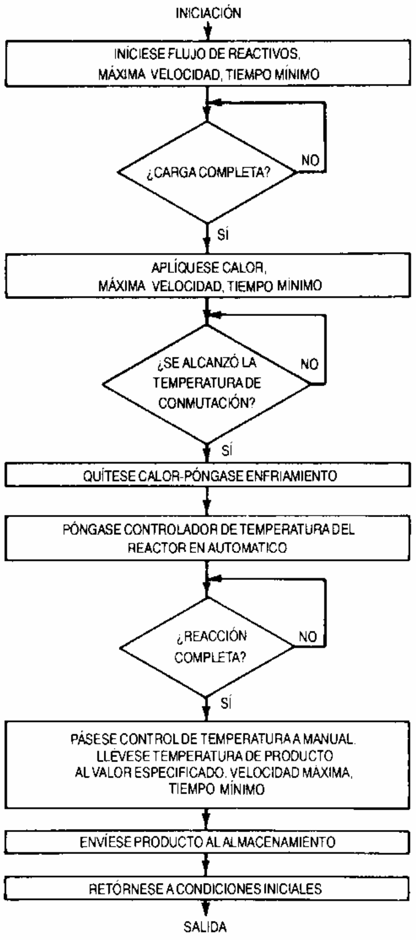


FIG. 22-185 Descripción del programa de control de un reactor por lotes.

con un gas inerte. Al
temperatura del rea
control en cascada
peratura del agua d
por medio de un lím

El problema de
tiempo mínimo, su
La operación manu
del flujo de ventil
temperatura del ag
dan los límites.

Se realizó un est
concerniente al pro
simulación reveló
debe desarrollar a l
iniciarse al princip
el tiempo mínimo
operación manual
la capacidad del c
tió instalar un con
relevador multipl
el fin de controla
relevador selecto
bajo del reactor o
la temperatura de

Control predict
mo controlador pr
de las técnicas de c
lotes. Este ejemplo
sintético mediante
trum. Technol., **16,**
de calor de la mezc
ma, y las variacion
en la velocidad de
enormemente del h
o pequeñas concen
dad deficiente; ad
pueden generar un
trol consiste en pro
ño de temperatura
versión predeterm

El esquema del
modelo de la cinét
en paralelo con el
ras del proceso me
so de la reacción
actividad del catal
una operación de t
reacción. Basánd
reactor en el cont
da una acción adi
los límites desead

Control de opti
se ha convertido
zación dinámica
kowitz, *Control E*
ble del rendimien
comprende cantid
minar una trayect
trol utilizando la
como guía, cada
computadora. Co
óptimo se utiliza
fin de mantener el
vel óptimo.

En el caso más
adoptan la forma:

na cantidad pequeña
n mejoramiento sus-
formación más com-
y las limitaciones del
a un reactor por lotes,
a e irreversible de la
esencia de un catali-
(octubre 1965).] Se
ha agregado una can-
. Un totalizador inte-
total predeterminado
grega al reactor vacío
lor; el iniciador se ha-
or se somete a presión

S,
IMO

NO

NIMO

NO

MIENTO

ATURA DEL

NO

A MANUAL
DUCTO
D MÁXIMA,

MIENTO

IALES

un reactor por lotes.

con un gas inerte. Al desarrollarse la reacción, los inertes se extraen; la temperatura del reactor se controla en forma automática mediante el control en cascada de la temperatura del agua de la cubierta. La temperatura del agua de la chaqueta y la presión del reactor se restringen por medio de un límite superior y uno inferior.

El problema de control consiste en desarrollar el proceso en un tiempo mínimo, sujeto a las restricciones de temperatura y presión. La operación manual consiste en que el operador ajuste la velocidad del flujo de ventilación y el flujo de masa de Y, de manera que la temperatura del agua de la cubierta y la presión del reactor no excedan los límites.

Se realizó un estudio de simulación para obtener más información concerniente al proceso y para aumentar el control automático. Esta simulación reveló que, para un tiempo mínimo de lote, el proceso se debe desarrollar a la presión máxima y la ventilación del reactor debe iniciarse al principiar la corrida. La simulación descubrió también que el tiempo mínimo de corrida era menor que la mitad del tiempo de operación manual, y que este tiempo mínimo está limitado por la capacidad del condensador de la purga. La simulación permitió instalar un controlador de presión, un relevador selector y un relevador multiplicador, como se ilustra en la figura 22-186, con el fin de controlar la adición de Y. En este patrón de control, el relevador selector elige el punto de referencia de presión más bajo del reactor o el producto de B por el punto de referencia de la temperatura de la chaqueta.

Control predictivo Una computadora analógica que funciona como controlador predictivo en línea servirá como ejemplo adicional de las técnicas de control disponibles para utilizarse en reactores por lotes. Este ejemplo es un reactor de planta piloto que produce caucho sintético mediante una reacción exotérmica. [Adams y Schooley, *Instrum. Technol.*, **16**, 57-62 (1969).] Las características de transmisión de calor de la mezcla de reacción se deterioran al desarrollarse la misma, y las variaciones de temperatura producen grandes fluctuaciones en la velocidad de reacción. Las propiedades del producto dependen enormemente del historial de temperatura de la reacción. Las grandes o pequeñas concentraciones de monómeros dan un producto de calidad deficiente; además, las grandes concentraciones de monómeros pueden generar una reacción secundaria rápida. El problema del control consiste en producir un lote de hule dentro de un intervalo pequeño de temperatura de reacción y luego detener la misma en una conversión predeterminada.

El esquema del control utilizado aparece en la figura 22-187. El modelo de la cinética de la reacción y el balance de energía se operan en paralelo con el reactor real, utilizando como entrada temperaturas del proceso medidas. En el tiempo real, el modelo calcula el curso de la reacción de acuerdo con la conversión del monómero y la actividad del catalizador. Periódicamente, el modelo se conmuta a una operación de tiempo rápido para predecir el estado futuro de la reacción. Basándose en esta predicción, el error de temperatura del reactor en el controlador se afecta debido a la temperatura futura, y da una acción adicional de control antes de que la reacción salga de los límites deseados.

Control de optimización La reacción de hidrogenación por lotes se ha convertido en el ejemplo clásico de laboratorio de la optimización dinámica de la operación unitaria por lotes. [Eckman y Lefkowitz, *Control Eng.*, **4**, 197-204 (1957).] En este ejemplo, la variable del rendimiento se describe mejor mediante una integral que comprende cantidades que varían con el tiempo. Se pueden determinar una trayectoria óptima para la reacción y parámetros de control utilizando la información concerniente a un lote usual. Con esto como guía, cada lote se regula con minuciosidad por medio de la computadora. Conforme avanza el lote, las desviaciones del nivel óptimo se utilizan para predecir y efectuar ajustes de control con el fin de mantener el lote en una trayectoria de reacción cercana al nivel óptimo.

En el caso más simple de esta índole, las variables de rendimiento adoptan la forma:

$$I = \int_0^T f(\dot{x}, x, t)\, dt$$

en donde x es la variable de proceso; $\dot{x}$ es dx/dt; t, el tiempo, y T el tiempo necesario para completar el lote. El problema consiste en encontrar la variación de x en función del tiempo, que aumente al máximo la variable de rendimiento I. Esta forma de función integral objetivo se utiliza, por lo común, para obtener una solución para la trayectoria óptima, empleando el cálculo de variación. La ampliación del problema para admitir algunas variables y multiplicadores lagrangianos, para manejar la introducción de restricciones, permite emplear esta técnica en problemas de control reales. Estas técnicas se usan cuando la dinámica es esencial para optimizar un lote mediante el control por computadora.

MAXIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA EN OPERACIONES UNITARIAS CONTINUAS

El control de las operaciones unitarias continuas más complejas, como columnas de destilación, puede dividirse en tres niveles: regulación dinámica, control del punto de ajuste y optimización de la eficiencia. La regulación dinámica, o control de primer nivel, incluye la función de controladores normales que manipulan válvulas para regular tales variables, como temperaturas, flujos, niveles y presiones. El control de punto de ajuste o segundo nivel adecúa los puntos de ajuste de los controladores de primer nivel para lograr los valores especificados para las variables de rendimiento o salidas de proceso. El tercer nivel, es decir, la optimización de la eficiencia de la unidad, computa las salidas de proceso específicas que darán una operación unitaria óptima, esto es, satisfacer las especificaciones de rendimiento con una ganancia máxima. En la figura 22-188 se ilustra esta estructura jerárquica del control.

Guardando una misma línea con la exposición anterior sobre la jerarquía del control por computadora, la información que entra en el bloque de optimización del rendimiento en la figura 22-188, partiendo de la parte superior, proviene de fuera del sistema de control de las operaciones unitarias. Se trata ya sea de una entrada al sistema de control de más alto nivel para un nivel de operación unitaria, o una entrada manual. También conviene señalar que tanto el nivel de regulación dinámica como el del control de punto de ajuste pueden comprender circuitos de control en cascada.

Como ejemplo, considérese una columna de destilación con control predictivo con computadora que debe aceptar cualquier tipo de alimentación que reciba. La computadora de control de punto de ajuste mantiene las composiciones de producto especificadas: la fracción del componente ligero clave en el producto de la parte inferior y la fracción del componente pesado clave en el producto del destilado, a una velocidad mínima de ebullición. El tercer nivel de control debe proporcionar las especificaciones de producto que darán el beneficio máximo.

La ecuación para el beneficio de una columna de destilación se escribe como sigue:

$$P = DV_D + BV_B - FV_F - C$$

en donde P = beneficio, D = destilado, V_D = valor del producto destilado, B = producto del fondo, V_B = valor del producto de la base, F = alimentación, V_F = costo de la alimentación, y C = costos de servicios. Se desea maximizar el beneficio P.

A veces es posible utilizar un modelo matemático del proceso para derivar una ecuación sencilla para la optimización del rendimiento, que se pueda utilizar en el control del tercer nivel. En el caso de la columna de destilación, con frecuencia se encuentra que la especificación de un producto se debe mantener a su nivel de pureza mínima. La otra especificación óptima de producto es una simple función de los valores de producto y las características de alimentación. Si se expresan en forma funcional, las ecuaciones de controlador de tercer nivel pueden ser

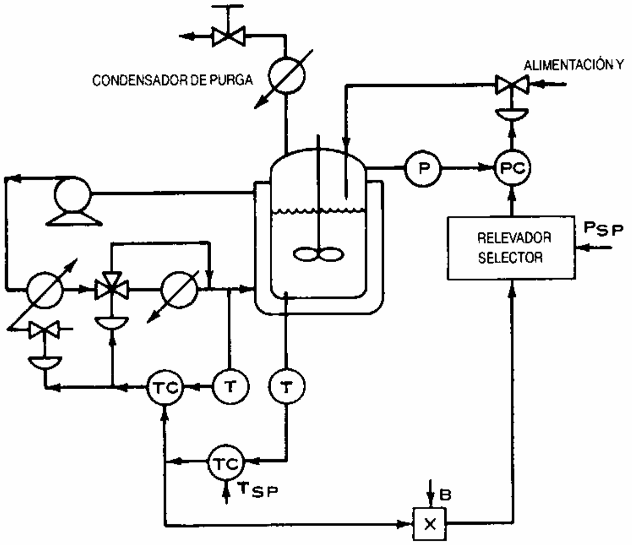


FIG. 22-186 Inyección controlada de alimentación a un reactor por lotes para mantener la presión y la temperatura del reactor dentro de límites preestablecidos.

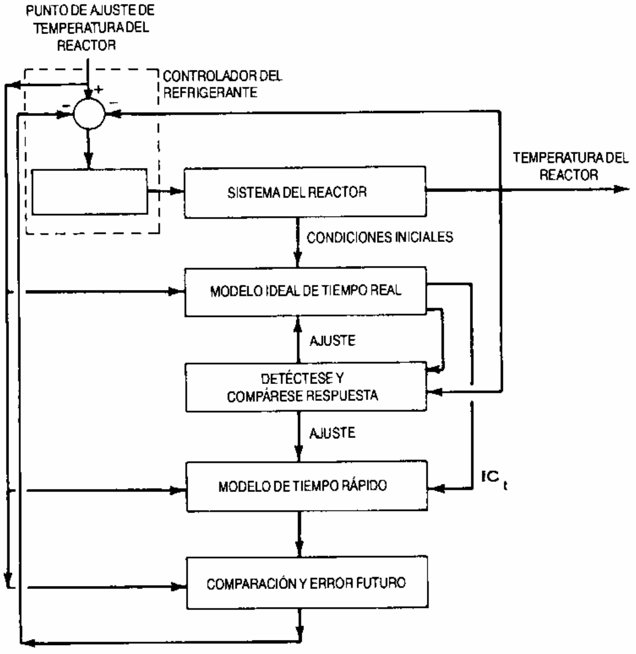


FIG. 22-187 Control por computadora analógica de tipo predictivo de un reactor por lotes para polimerización exotérmica.

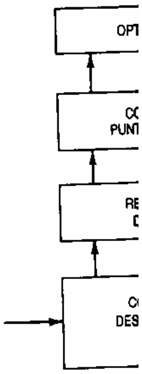


FIG. 22-188 Estru
ción unitaria de desti

DESARROLLO

La secuencia gen
que aquí se descr
una salida como
No obstante, en e
cesariamente en l
Establecimie
objetivo básico
miento es la prod
cedimientos de o
máximo, dentro
tituyen el mejor
operadores de la
de una manera n
cuando se trata
minación de eso
sarrollo de un si
Al establecer
variables de dese
sean medidas o c
proceso para sat
necesitan sistem
de que se siguen
Definición de
ficados los obje
objetivos del sis
jetivos del siste
con los objetivo
consiste en man
cada, el objetivo
razón de la velo
proceso. En la p
factibilidad técn

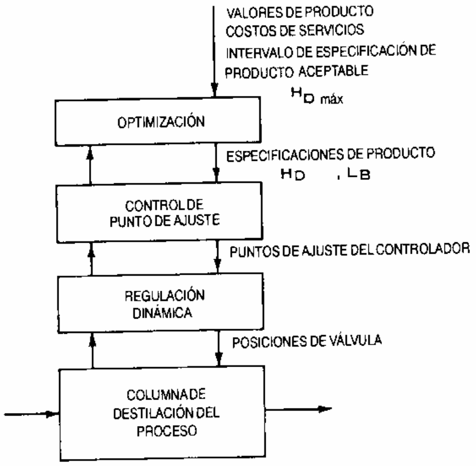


FIG. 22-188 Estructura jerárquica del control correspondiente a la operación unitaria de destilación.

$$H_D^* = H_{D\max}$$
$$L_B^* = f(V_D, V_B, F, F_C)$$

en donde H_D^* = fracción óptima del componente pesado clave en el destilado, $H_{D\text{máx}}$ = valor máximo permisible de H_D, L_B^* = valor óptimo del componente ligero clave en el producto del fondo, y F_C = composición de la alimentación.

Por lo tanto, la computadora de control de tercer nivel necesita mediciones de la velocidad de alimentación y la composición de la misma, los valores de productos especificados y la máxima impureza permisible en las especificaciones de un producto que maximicen los beneficios. Esta configuración aparece ilustrada en la figura 22-188.

Las salidas de muchas operaciones unitarias no son productos finales con valores de venta conocidos, sino corrientes intermedias de proceso que son la alimentación de otro proceso unitario. Así, pues, la unidad se debe optimizar con valores de productos supuestos que deben ser realistas y que pueden variar con otros factores. Puesto que el producto del fraccionador antes analizado es, por lo común, la alimentación de otra unidad, sucede casi siempre que el segundo nivel de control es el más elevado que debe funcionar en línea. El tercer nivel necesita ajustes poco frecuentes y puede realizarse fuera de línea.

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL

La secuencia generalizada para el desarrollo de un sistema de control que aquí se describe satisface tanto el proceso simple de una entrada-una salida como el control por computadora de una planta completa. No obstante, en el caso sencillo, los nueve pasos no se identifican necesariamente en forma específica.

Establecimiento de los objetivos de operación del proceso El objetivo básico de funcionamiento de cualquier unidad de procesamiento es la producción rentable de un producto específico. Los procedimientos de operación para los cuales el proceso rinde el beneficio máximo, dentro de las restricciones de la calidad del producto, constituyen el mejor conjunto de objetivos del operador. No obstante, los operadores de la planta no siempre están en posición de especificar de una manera muy precisa los objetivos de la operación, sobre todo cuando se trata de los de tipo económico. Por consiguiente, la determinación de esos objetivos representa un paso importante para el desarrollo de un sistema de control.

Al establecer los objetivos de operación se concretan también las variables de desempeño o rendimiento del proceso. Estas variables, ya sean medidas o computadas, determinan la calidad del desempeño del proceso para satisfacer los objetivos de la operación. En ocasiones se necesitan sistemas de control por computadora para tener la seguridad de que se siguen los objetivos de operación.

Definición de los objetivos del sistema de control Una vez especificados los objetivos de operación del proceso, se deben estipular los objetivos del sistema de control. Desde un punto de vista ideal, los objetivos del sistema de control tienen una correspondencia de uno a uno con los objetivos de operación. Por ejemplo, si el objetivo de operación consiste en mantener constante una composición de producto especificada, el objetivo del sistema de control es regular, póngase por caso, la razón de la velocidad de flujo entre dos materiales que participan en el proceso. En la práctica, la correspondencia se puede limitar mediante la factibilidad técnica y económica del sistema de control requerido.

Otro objetivo es satisfacer la precisión necesaria del control. La especificación de la precisión de control requerida comprende por lo común determinar los límites permisibles de variación de la variable controlada, tanto en lo que respecta a su valor como a su variación de tiempo.

Determinación de las restricciones del proceso Estas restricciones incluyen conceptos como pureza mínima del producto, temperatura máxima del proceso, velocidades máximas de flujo y presión máxima. Las restricciones son, por lo común, algún límite de funcionalidad del equipo de procesamiento, límites de calidad de producto, límites en las condiciones de procesamiento o restricciones de seguridad. Estas restricciones imponen límites no sólo al proceso, sino también a la cantidad de acción de control y la velocidad con que se puede ejecutar dicha acción. Por ejemplo, la determinación del tamaño de una válvula y la capacidad de compensación pueden ser restricciones importantes del control.

Identificación de fuentes y características de las perturbaciones La magnitud, duración y frecuencia relativas de aparición de perturbaciones no controladas que se infiltran en el sistema de procesamiento, y las consecuencias de tales perturbaciones en el proceso indican la naturaleza del sistema de control necesario. La base para la síntesis de un sistema de control es la determinación de la naturaleza de tales perturbaciones y su efecto en las variables de rendimiento junto con los objetivos de operación y control.

Determinación de las características dinámicas del proceso Para completar el diseño de un sistema de control y especificar el desempeño de la acción de control requerida, es necesario tener cierto conocimiento de la dinámica del proceso. Esta dinámica incluye la respuesta en el tiempo del proceso a perturbaciones, la descripción dependiente del tiempo de las interacciones de proceso originadas por perturbaciones, y la respuesta dependiente del tiempo de las variables de rendimiento del proceso tanto a perturbaciones como a acciones de control.

En este punto del procedimiento de análisis es donde los patrones de control alternos comienzan a presentarse en forma clara.

Examen de la factibilidad técnica y económica Este paso incluye la descripción inicial de un sistema de control completo propuesto para el proceso. En esta etapa, cada circuito de control se debe evaluar en lo que respecta a su contribución en los objetivos de control y operación, así como su costo. En muchos casos este análisis debe ser cualitativo y basarse en la experiencia del evaluador.

En esta etapa aparecen situaciones como la sobreinstrumentación, especificaciones del desempeño del controlador excesivamente severas, intercambios entre el equipo de control y procesamiento y sobrecompensación para las consecuencias de la confiabilidad del sistema de control.

Consideración de soluciones alternativas Para un proceso determinado, se tendrá probablemente una mejor solución desde el punto de vista técnico. No obstante, pueden existir varios diseños que den el rendimiento técnico adecuado pero un rendimiento económico mejorado cuando se compara con la mejor solución técnica.

En las etapas que se acaban de definir se encontrarán indicios respecto a algunas alternativas que se consideran normalmente. Sin embargo, quizá sea necesario introducir nuevos conceptos en este punto.

Una de las comparaciones más difíciles que se deben hacer es la confiabilidad en función de los costos de inversión, la operación y el mantenimiento entre varios fabricantes de equipos de procesamiento y control. Las previsiones que deben hacerse para los procedimientos de mantenimiento tienen una mayor comprensión en la actualidad cuando se relacionan con equipos de procesamiento que cuando se trata de equipos de control. No obstante, ambas clases de equipo forman parte integrante del sistema de procesamiento.

Hasta este punto, el desarrollo de un sistema de control es un proceso iterativo para llegar a la solución deseada. Con todo, en interés del costo, esta iteración no puede ser limitada. En los casos más simples, la iteración no será evidente.

Finalización del diseño de un sistema de control Las etapas finales de desarrollo de un sistema de control parecen ser obvias, pero son importantes. La finalización del diseño pone los resultados de las etapas antes citadas dentro de un sistema completo que se puede poner en práctica. Desde el punto de vista de un operador de procesos, el diseño no queda completo sino hasta que las constantes de ajuste de los controladores se especifican. Esto significa que, en algunos casos, el diseño no queda del todo concluido hasta que el sistema de control está funcionando.

Con excepción de los ajustes requeridos para que el sistema de control maneje el proceso, el diseño final permite iniciar el pedido del equipo, la planificación de la construcción, la planificación del adiestramiento del operador, la programación de la computadora y otras actividades necesarias para que el sistema quede instalado.

Conclusión del desarrollo del sistema de control Las últimas etapas del desarrollo de un sistema de control incluyen la construcción, la verificación y el ajuste, el adiestramiento y la preparación del operador, así como la documentación completa. Estas etapas finales se deben llevar a cabo en un tiempo apropiado, porque no se dispondrá de los beneficios económicos del sistema de control hasta que el sistema esté funcionando y el personal de operación tenga la suficiente confianza para utilizar al máximo sus capacidades.

RECURSOS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL

En las subsecciones "Fundamentos del control automático", "Ajustes del controlador" y "Temas adicionales sobre el control", se cubrieron algunos recursos y técnicas básicas para analizar sistemas de control. En las siguientes subsecciones se examinarán otros recursos y otras técnicas que es factible utilizar en sistemas más complejos que los de proceso de una sola entrada y una sola salida. Los recursos particulares que se emplean variarán según su disponibilidad, disponibilidad de personal experimentado y la etapa de desarrollo en que se encuentra el proceso, es decir, un nuevo proceso que emerge de la planta piloto, una nueva planta que utiliza un proceso comprobado o la modernización de un proceso ya existente.

Análisis de la respuesta a la frecuencia El análisis de la respuesta a la frecuencia es un método para investigar las características de un proceso de circuito cerrado, basándose en su respuesta de circuito abierto a entradas senoidales. Dados ya sea una función de tranferencia o datos experimentales de la respuesta a la frecuencia, el método permite calcular los ajustes del controlador, y predice los límites de estabilidad del sistema de circuito cerrado. Véase "Ajustes del controlador" en relación con las figuras 22-41 a la 22-44.

La respuesta a la frecuencia de un proceso se define como la relación en amplitud y fase entre una salida de proceso y una entrada senoidal después de que haya desaparecido cualquier elemento transitorio de la respuesta. Desde un punto de vista matemático, la respuesta a la frecuencia es la solución particular de las ecuaciones diferenciales de los sistemas de proceso para una función senoidal de fuerza. La estipulación de que los elementos transitorios deben desaparecer requiere que el sistema sea estable.

Puesto que, en general, el análisis de la respuesta a la frecuencia utiliza en forma extensa los métodos de las transformadas de Laplace, el sistema que se va a analizar debe ser también lineal o de tal índole que se pueda calcular por medio de un sistema lineal.

Diagrama de Bode Los datos de respuesta a la frecuencia se representan de una manera más conveniente mediante un diagrama de Bode.

Los datos de amplitud se expresan, a menudo, en decibeles (dB), en donde $dB = 20 \log_{10} AR$. Por lo común, ω se da en radianes por segundo y ϕ en grados. Véase la figura 22-41.

Se puede demostrar que, cuando se dispone de una función de transferencia $G(s)$, los datos de amplitud y fase para un diagrama de Bode se obtienen sustituyendo $s = j\omega$, en donde $j = \sqrt{-1}$, y expresando $G(j\omega)$ en la forma polar.

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|\, e^{j\angle G(j\omega)}$$
$$AR = |G(j\omega)|$$
$$\phi = \angle G(j\omega)$$

Los valores de AR y ϕ se calculan para varios valores de ω, con el fin de obtener la información necesaria; pero si $G(s)$ no es una función simple, estos cálculos pueden resultar bastante tediosos. Hay una solución gráfica aproximada muy fácil de realizar, y con frecuencia es lo suficientemente exacta para utilizarse en lugar de las verdaderas curvas de respuesta a la frecuencia.

Para un sistema de primer orden, $G(s) = 1/(Ts + 1)$. Al sustituir $s = j\omega$ y separarla en las partes real e imaginaria,

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + (T\omega)^2} - j\,\frac{T\omega}{1 + (T\omega)^2}$$

Utilizando la regla del triángulo rectángulo para determinar la magnitud y la fase (Fig. 22-189), se obtiene

$$AR = |G| = \frac{1}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}} \qquad \text{y} \qquad \phi = \tan^{-1}(-T\omega)$$

Consúltese la tabla 22-4. $\log AR = -\frac{1}{2} \log [1 + (T\omega)^2]$. Por tanto, conforme $T\omega \rightarrow 0$, $AR \rightarrow 1$; de tal manera que la asíntota de baja frecuencia de la gráfica de amplitud es una línea horizontal en $AR = 1$. Véase figura 22-42.

Conforme $T\omega \rightarrow \infty$, $\log AR \rightarrow -\log T\omega$; de modo que la asíntota de alta frecuencia es una línea cuya pendiente es -1 y pasa por el punto $AR = 1$, $T\omega = 1$. La frecuencia $\omega_c = 1/T$ a la que las asíntotas se cortan es la frecuencia de vértice. A esta frecuencia,

l, disponibilidad de
ı que se encuentra el
la planta piloto, una
o la modernización

l análisis de la res-
stigar las caracte-
sándose en su res-
.les. Dados ya sea
ıentales de la res-
ılar los ajustes del
lad del sistema de
ador" en relación

ine como la relación
na entrada senoidal
:nto transitorio de la
a respuesta a la fre-
diferenciales de los
fuerza. La estipula-
›arecer requiere que

esta a la frecuencia
ırmadas de Laplace,
ineal o de tal índole
ɛal.
frecuencia se repre-
ı diagrama de Bode.
n decibeles (dB), en
ıdianes por segundo

na función de trans-
ı diagrama de Bode
$\overline{-1}$, y expresando

valores de ω, con
o si $G(s)$ no es una
ar bastante tedio-
y fácil de realizar,
para utilizarse en
la frecuencia.
l). Al sustituir $s = j\omega$

eterminar la magni-

= tan⁻¹ (−Tω)

ω)²]. Por tanto, con-
la de baja frecuencia
:n $AR = 1$. Véase fi-

lo que la asíntota de
pasa por el punto AR
ıtotas se cortan es la

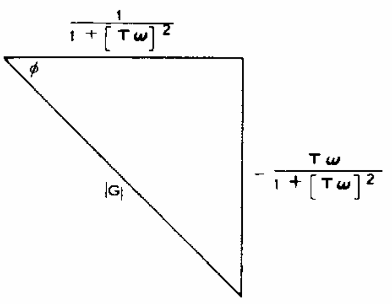


FIG. 22-189 Relaciones entre el ángulo de fase y la magnitud de $G(s)$.

$$AR = \frac{1}{\sqrt{1 + T^2(1/T)^2}} = 0.707$$

Los métodos asintóticos para la gráfica de fase no son tan exactos como los que se tienen para la gráfica de AR. Si se observa que $\phi \rightarrow 0$ a bajas frecuencias y $\phi \rightarrow -90°$, a altas frecuencias, y que la curva es simétrica en torno a ω_c, se pueden utilizar los siguientes valores para calcular la curva en forma aproximada: $\omega = 1/T$, $1/2T$, y $1/10T$, y $\phi = -45, -27$, y $-6°$, respectivamente.

Como se muestra en la tabla 22-4, para un sistema de segundo orden existe un parámetro adicional que es ξ. Por lo tanto, se tiene una gráfica de Bode distinta para cada valor de ξ, como se indica en la figura 22-41.

A frecuencias elevadas, $\log AR \rightarrow -2 \log T\omega$ y la asíntota de alta frecuencia de AR para el sistema de segundo orden tiene una pendiente de −2. El pico de la curva AR cercano a $T\omega = 1$ se debe al fenómeno de resonancia que se presenta en sistemas subamortiguados. Obsérvese también que, a frecuencias elevadas, $\phi \rightarrow -180°$ y a $T\omega = 1, f_c = -90°$.

Cuando un sistema de segundo orden se sobreamortigua, $\xi > 1.0$, como sucede normalmente en los procesos químicos, se puede representar como dos sistemas reales de primer orden en serie. Puesto que la multiplicación de números complejos se efectúa mediante la multiplicación de la magnitud y la suma de los ángulos de fase, el diagrama de Bode para el sistema global se obtiene sumando gráficamente las curvas de los dos sistemas de primer orden.

Un retraso de transportación no contribuye con nada en la razón de amplitud, pero introduce un retraso de fase que se incrementa sin límites (véase la tabla 22-4).

La verdadera integración $G(s) = 1/T_i s$ y la derivación $G(s) = T_d s$ manifiestan respuestas a la frecuencia, como las que presentan las extensiones de las porciones de línea recta que aparecen en la figura 22-44. Por tanto, un controlador ideal de modo de control mixto, por ejemplo, del tipo proporcional-integral-derivativo con función de transferencia

$$G_c(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)(1 + T_d s)$$

dará una gráfica de Bode, que será una composición de las curvas trazadas en líneas continuas que se muestran en la figura 22-44.

Un controlador real tiene efectos limitantes, que hacen que la verdadera respuesta a la frecuencia se desvíe del ideal a frecuencias altas o bajas. Un controlador real común puede tener una función de transferencia del tipo:

$$G_c(s) = K_c \frac{T_i s + 1}{T_i s + 1/K_i} \frac{T_d s + 1}{T_d s/K_d + 1}$$

Estos datos los proporciona, casi siempre, el fabricante del controlador.

Criterio de estabilidad de Bode Considérese un circuito de control abierto entre el controlador y la válvula de control, en el cual se aplica a la válvula una señal senoidal de baja frecuencia. Una vez que ha desaparecido la respuesta transitoria, las señales de proceso aplicadas al controlador tendrán la misma frecuencia que la entrada. Se incrementa la frecuencia de entrada a la válvula hasta que la señal de salida del controlador esté en fase con la entrada de la válvula. Esto ocurrirá a la frecuencia a la que $\phi = -180°$. En este punto, la ganancia del controlador K_c se ajusta hasta que las amplitudes de la entrada senoidal y la salida del controlador son idénticas. Esto corresponde al desplazamiento vertical de la gráfica de AR, de tal manera que en ω, en donde $\phi = -180°$, $AR = 1$. Si el circuito se cierra y se suprime la entrada senoidal, el sistema seguirá oscilando con amplitud y frecuencia constantes. En otras palabras, las condiciones de circuito abierto de $AR = 1, \phi = -180°$, corresponde a los límites de estabilidad de la respuesta de circuito cerrado.

Este método para determinar los límites de estabilidad de circuito cerrado, que parte de la respuesta a la frecuencia del circuito abierto, se conoce como criterio de estabilidad de Bode, y constituye la base para las especificaciones de los márgenes de ganancia y de fase para diseñar el sistema de control.

Las especificaciones de los márgenes de ganancia y fase dependen de la aplicación de que se trate, y se considerarán como factores de seguridad. Esto da la posibilidad de que se haga una estimación de los ajustes del controlador, de tal modo que puedan lograrse cambios razonables en dichos ajustes sin que se llegue a la inestabilidad.

Periodo final Cuando se trata de un controlador de dos o tres modos, se puede hacer variar más de un parámetro de control para satisfacer las especificaciones de los márgenes de ganancia y fase, de modo que aplicar un procedimiento de prueba y error es lo indicado. El método del periodo final de Ziegler y Nichols prescribe unas cuantas reglas sencillas para determinar los ajustes del controlador que hacen innecesarios los cálculos por prueba y error. Estas reglas, cuyo resumen se incluye en la tabla 22-5, se basan principalmente en la experiencia que se tiene en el control de procesos usuales, utilizando el concepto del margen de ganancia. Los ajustes que dan se deben considerar como cálculos iniciales. Los ajustes del controlador de Ziegler-Nichols se determinan basándose en la respuesta del sistema de circuito abierto. La ganancia final K_u se define como el margen de ganancia, es decir, la recíproca de AR a $\phi = -180°$. El periodo final P_u se define como $2\pi/\omega_u$ en donde ω_u es la frecuencia en radianes/minuto a $\phi = -180°$.

Los ajustes del controlador para el modo proporcional-derivada no se pueden calcular partiendo de este método. Un procedimiento que se emplea comúnmente en este caso consiste en seleccionar T_d, de tal manera que K_c se maximice cuando el margen de fase está ubicado en la especificación, con lo cual se minimiza la desviación.

Verificación de pulsos Los tiempos de verificación de la curva de reacción y respuesta a la frecuencia son en general prolongados, en comparación con los tiempos de respuesta del proceso. Las verificaciones de pulsos se ejecutan cambiando la entrada de proceso de circuito abierto de un valor de estado estacionario a otro valor "apropiado", durante un periodo "adecuado" y devolviendo después la entrada al valor de estado estacionario mientras se observa la respuesta de salida. Así, pues, la duración de las pruebas es normalmente del mismo orden que los tiempos de respuesta del proceso, y la salida de proceso retorna a su valor inicial de estado estacionario al concluir la prueba.

Teóricamente, la verificación de pulsos se ejecuta una sola vez. La transformación de Fourier de un pulso que contiene energía de muchas frecuencias demuestra que esto debe ser suficiente. Sin embargo, la selección de la magnitud apropiada y la duración adecuada del pulso es de primordial importancia, ya que una elección deficiente de cualquiera de ambas puede requerir pruebas adicionales. Este método requiere la sustitución del pulso de entrada $x(t)$ y la respuesta de salida $y(t)$ en

$$G(j\omega) = \left[\int_0^{\infty} e^{-j\omega t} y(t)\, dt\right] \Bigg/ \left[\int_0^{\infty} e^{-j\omega t} x(t)\, dt\right]$$

e integrando para un intervalo de frecuencia ω. Cada integración (que casi siempre es de tipo numérico) proporciona un punto para las gráficas de "ganancia en función de la frecuencia" y "desplazamiento de

fase en función de la frecuencia". Las principales desventajas del procedimiento dinámico de verificación de pulsos son la gran cantidad de almacenamiento de datos, manipulación y computación que se requieren; su principal ventaja es el número pequeño de corridas de prueba que requiere un estudio.

Un mejoramiento de la prueba de pulso es marcar el tiempo de la supresión de la entrada del pulso y retornar al valor inicial de estado estacionario cuando la primera derivada de la respuesta de proceso es un máximo. [Pemberton "*An Improved Pulse Testing Method*" *Instrum. Technol.*, **17**, 61-67 (diciembre 1970).] En la notación de Laplace, una respuesta de proceso de segundo orden más tiempo muerto a una entrada de pulso se representa mediante la expresión

$$C(s) = \frac{KX(s)\,e^{-Ls}}{T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$$

en donde $X(s)$ es el pulso de entrada. En el dominio del tiempo, esto es una ecuación diferencial:

$$T_1T_2\frac{d^2c(t)}{dt^2} + T_1T_2\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = Kx(t - L)$$

El pulso de entrada de amplitud A, que se ilustra en la figura 22-190, se describe mediante la expresión

$$x(t) = A[U(t) - U(t - t_1)]$$

$$\text{en donde } U(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad \text{y} \quad U(t - t_1) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ 1 & t > t_1 \end{cases}$$

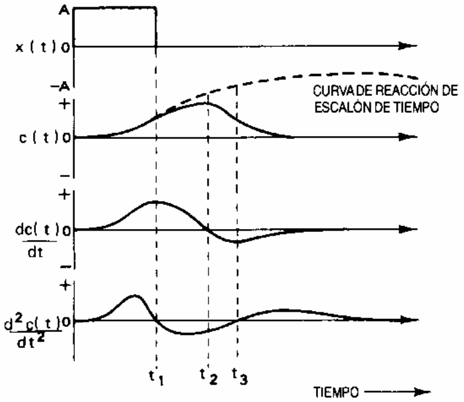


FIG. 22-190 La respuesta $c(t)$ de un proceso usual y las derivadas de esta respuesta para un pulso de entrada $x(t)$.

Basándose en la ecuación diferencial y la expresión para $x(t)$, se pueden calcular las características del proceso. Expresado de otra manera,

$$K = \frac{1}{A}\frac{c(t_1)}{[1 - c(t_3)/c(t_2)]}$$

$$L = t_1 + t_2 - t_3$$

$$T_2 \cong \left[0.925\frac{KA}{c(t_1)} - 2.3\right](t_3 - t_2)$$

$$T_1 \cong \left[\frac{3c(t_1)}{KA}\right]^3 T_2$$

en donde t_1 = tiempo en que $dc(t)/dt$ es un máximo
t_2 = tiempo en que $c(t)$ es un máximo
t_3 = tiempo en que $dc(t)/dt$ es un mínimo

Existen expresiones similares para un pulso de dos lados, en el cual uno de ellos tiene una amplitud $-A$ y sigue inmediatamente al pulso inicial de amplitud A, y en donde el segundo pulso concluye en t_3, cuando $dc(t)/dt$ es un mínimo.

Análisis mediante la reducción de los grados de libertad La ilustración de un análisis usual de una operación unitaria según los grados de libertad (variables independientes) indica la forma cómo éstos se reducen gracias a los controles basados en las variables de rendimiento.

Reactor químico Examínese un reactor que se utiliza para desarrollar una reacción exotérmica, en donde la alimentación consiste en reactivo, diluyente y catalizador. Este reactor, que se puede ver representado por medio de un esquema en la figura 22-191, se trata de una simplificación de un proceso real puesto bajo control de computadora.

Las principales simplificaciones se asocian con las siguientes proposiciones de las características de proceso. Dos propiedades principales del producto se determinan a través de la temperatura del reactor y la concentración de reactivo en el mismo. El catalizador sale del proceso con el producto, y una de las especificaciones de aceptabilidad del mismo es la concentración máxima de catalizador en el producto. La productividad del catalizador (razón producto-catalizador) es afectada por la concentración del producto en el reactor. Las corrientes de alimentación se agregan en forma continua al reactor. Se emplean dos analizadores de proceso automáticos para obtener la concentración del reactivo en el efluente del reactor, así como la densidad del fluido del mismo.

Los controles ilustrados en la figura 22-191 representan un control automático normal para este tipo de reactores. La velocidad de flujo del agua de enfriamiento se controla sobre una base volumétrica. La temperatura de entrada del agua de enfriamiento se controla regulando la separación volumétrica del agua de enfriamiento en dos intercambiadores de calor paralelos: uno que calienta y otro que enfría, como se observa en la figura 22-48. La temperatura del reactor se controla mediante una conexión en cascada para regular el punto de referencia del controlador de la temperatura de entrada del refrigerante. El reactivo, el catalizador y el diluyente se someten a un control de gasto volumétrico. La presión del reactor se controla regulando la velocidad de descarga de la mezcla de reacción del reactor.

Variables Las variables de rendimiento de este reactor son la velocidad de producción y las propiedades del producto. estas variables de rendimiento son funciones de las variables independientes (grados de libertad) estipulados en la tabla 22-14. De los 18 grados de libertad, 6 son puntos de referencia del controlador que especifica el operador, y 12 están en libertad de quedar sin control. Un cambio en cualquiera de las variables no controladas alterará por lo menos una variable de rendimiento.

Las fuentes primarias de perturbaciones son aquellas que afectan la concentración eficaz del catalizador dentro del reactor, y aquellas que afectan la composición de la mezcla de reacción y el balance de calor. Las perturbaciones que afectan la concentración eficaz del catalizador incluyen variaciones en los venenos del catalizador y las variaciones en la alimentación del catalizador. En todas las corrientes de alimentación hay presentes venenos de catalizador.

Las perturbaciones que afectan la composición de la mezcla de reacción y el balance de calor son alteraciones que afectan el flujo de masa de la alimentación (incluyendo las variaciones en el flujo volumétrico, las temperaturas de alimentación, la presión del reactor y las presiones de la alimentación), las variaciones en la cantidad de reactivo en el diluyente de reciclaje y las variaciones en la concentración del catalizador.

Los controles normales especificados en la figura 22-191 no requieren nada especial en lo que respecta a un algoritmo de control; en otras palabras, se pueden llevar a cabo mediciones directas de las variables reguladas, y será suficiente con controladores normales de tres modos. En el sistema de control por computadora se emplean variables computadas y algunos algoritmos de control especiales.

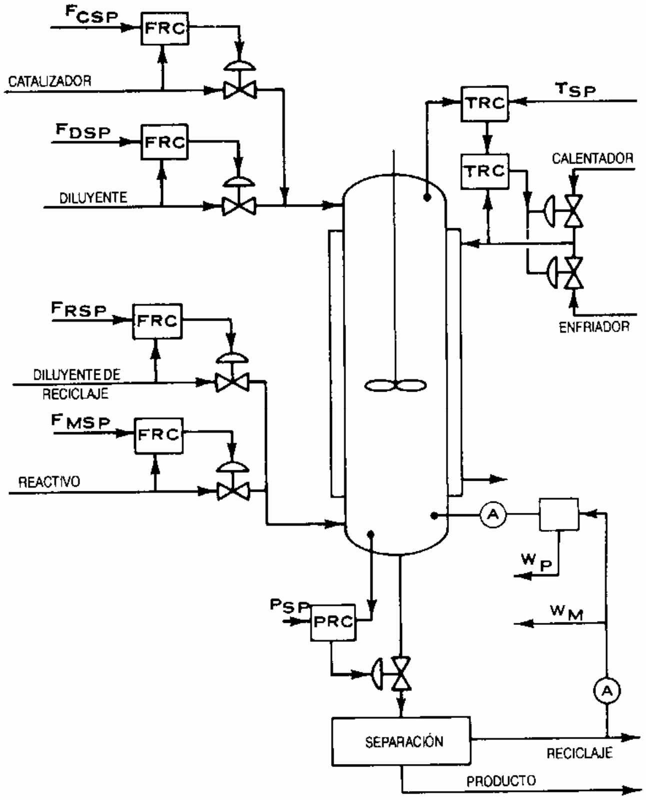


FIG. 22-191 Control convencional de un reactor químico.

Las variables de rendimiento se escriben como funciones de los grados de libertad estipulados en la tabla 22-14. Las variables de rendimiento son el volumen de producción PR, una propiedad de producto dependiente de la temperatura, el índice de producto I y la productividad del catalizador PY. En la tabla 22-15 se ilustra una reducción escalonada en los grados de libertad conforme se van agregando controles. En la tabla 22-15, las variables individuales independientes no se indican para variables de rendimiento si los grados de libertad representan más de tres; sólo se da la cantidad total. Por ejemplo, la velocidad de producción es una función de las 18 variables.

TABLA 22-14 Lista de variables independientes o grados de libertad de un reactor químico

	Variables manipuladas		Variables no controladas	
Fuente	Puntos de ajuste del contador	Símbolo	Variable	Símbolo
Catalizador	Gasto (velocidad del flujo)	F_{CSP}	Concentración de alimentación del catalizador	E_C
Venenos del catalizador	. . . . . .	. . . . . .	Velocidad efectiva de adición de venenos	C_P
Diluyente nuevo	Gasto (velocidad del flujo)	F_{DSP}	Temperatura, presión	T_D, P_D
Diluyente reciclado	Gasto (velocidad del flujo)	F_{RSP}	Temperatura, presión composición	T_R, P_R, C_R
Reactivo.	Gasto (velocidad del flujo)	F_{MSP}	Temperatura, presión	T_M, P_M
Reactor.	Temp., presión	T_{SP}, P_{SP}	Concentración del producto, concentración del reactivo, densidad	W_P, W_M, ρ
Total		6		12

Control del flujo de masa Puesto que la composición del fluido del reactor regula la reacción química que se está desarrollando, el flujo de masa de los componentes de la alimentación se relaciona con mayor facilidad con las condiciones de reacción. Las fluctuaciones pequeñas no controladas de las corrientes de fluido que arrastran veneno para el catalizador introducen perturbaciones en la velocidad de producción. Esto se debe a que los venenos actúan rápidamente sobre el catalizador reduciendo su productividad. La alta productividad depende de que el catalizador se mantenga activo durante gran parte de su tiempo de residencia dentro del reactor.

Si se altera el control del flujo de masa de todas las corrientes de alimentación, se eliminan nueve grados de libertad y se agregan tres gastos-masa respectivos como grados de libertad, para lograr una reducción total de seis.

Control de la composición de la mezcla de reacción La mezcla de reacción se compone de reactivo, diluyente, producto y catalizador. La

TABLA 22-15 Reducción de los grados de libertad de un reactor químico al tener controles automáticos

Variables de rendimiento como funciones de las variables independientes: PR	I	PY	Grados de libertad	Control agregado	Variables eliminadas por el control	Variables agregadas por el control	Grados de libertad suprimidos
18	6	18	18	Flujo de masa de las alimentaciones M	T_D, F_{DSP}, P_D, T_R, F_{RSP}, P_R, T_M, F_{MSP}, P_M	M_{DSP}, M_{RSP}, M_{MSP}	6
12	4	12	12	Concentración del reactivo dentro del reactor	M_{MSP}, W_M, C_R	W_{MSP}	2
10	W_{MSP}	10	10	Concentración del producto dentro del reactor	M_{RSP}, W_P	W_{PSP}	1
9	W_{MSP}, T_{SP}, P_{SP}	9	9	Temperatura del reactor	T_{SP}	....	1
8	W_{MSP}, P_{SP}	8	8	Presión del reactor	P_{SP}	....	1
7	W_{MSP}	7	7	Flujo del diluyente	M_{DSP}	....	1
6	W_{MSP}	6	6	Volumen de producción *PR*	E_C, C_P, F_{CSP}, W_C	PR_{SP}, no es un grado de libertad	4
W_{PSP}, W_{MSP}, PR_{SP}	W_{MSP}	W_{PSP}, W_{MSP}, PR_{SP}	2	Índice de producto *I*	W_{MSP}	I_{SP}, no es un grado de libertad	1
W_{PSP}, PR_{SP}	I_{SP}	W_{PSP}, PR_{SP}	1	Relación producto a catalizador *PY*	W_{PSP}	PY_{SP}, no es un grado de libertad	1
PR_{SP}, PY_{SP}	I_{SP}	PR_{SP}, PY_{SP}	0				

concentración del reactivo determinada al resolver un balance de masa dinámico (ecuación diferencial) es la variable medida que sirve para el control automático. La concentración de reactivo, computada en comparación con el punto de referencia W_{MSP}, genera una señal de control, que restaura el gasto-masa del reactivo para una reducción de uno en los grados de libertad. La concentración se determina también mediante el muestreo del efluente del reactor por medio del analizador automático. Puesto que la concentración del reactivo puede salirse del intervalo de operación antes de que se disponga de los resultados del analizador, éstos se emplean para actualizar automáticamente el cálculo de la concentración del reactivo.

La concentración de producto en el reactor se controla regulando el flujo del diluyente de reciclaje. La concentración de producto computada se basa en parte en una medición de densidad automática. Ésta se compara con el punto de ajuste de concentración para generar una señal de control que regule el flujo de reciclaje, reduciendo así en dos los grados de libertad. En este punto, las concentraciones de producto y reactivo en el reactor se encuentran bajo control del punto de ajuste.

Los puntos de ajuste de la temperatura, la presión y el flujo de diluyente fresco del reactor se determinan según las propiedades del producto determinadas en el laboratorio, la operabilidad del reactor y la capacidad de compensación de reciclaje. Estos criterios para determinar los puntos de ajuste dependen de la información que se suministre, por lo menos en parte, a través de fuentes externas al medio inmediato del reactor. Por consiguiente, se les coloca bajo un control de punto de ajuste de tipo manual.

Control de las variables de rendimiento En los párrafos anteriores, los grados de libertad se redujeron (logrando con ello un sistema más simple de operar) y las variables que son más fundamentales, se convierten en las variables de punto de ajuste. Para reducir más aún los grados de libertad, las consideraciones de control se llevan ahora al campo de las variables de rendimiento.

El volumen de producción, determinado al resolver el balance de calor dinámico, es una variable computada que, cuando se controla, elimina cuatro grados de libertad asociados con el rendimiento del catalizador. PR_{SP}, el punto de ajuste de la variable de rendimiento, se determina normalmente tomando en cuenta las condiciones externas a la operación unitaria, es decir, ventas e inventario. Por tanto, se ajusta de un modo manual. Un ejemplo de este tipo de control se analizó ya en relación con la figura 22-176.

En este proceso, la velocidad de producción es una función de ciertas variables eliminadas en las listas tabuladas en los renglones de la tabla 22-15, superiores a la hilera en donde se introduce PR_{SP}. Sin embargo, si se regula la concentración del catalizador, se obtendrá el volumen de producción deseada. Por consiguiente, la velocidad de flujo del catalizador se selecciona como variable regulada.

Los dos grados de libertad restantes se eliminan convirtiéndolos en puntos de ajuste de tipo manual. No obstante, si se dispone de modelos de proceso lo suficientemente buenos, se pueden calcular estas dos variables. En este caso, se convertirán en variables controlables, cuyos puntos de ajuste podrían determinarse basándose en el rendimiento de estado estacionario, como indican los análisis periódicos de laboratorio.

La concentración de punto de ajuste del reactivo W_{MSP} se suprime como grado de libertad, designándolo como punto de ajuste controlado por el operador y basado en los resultados de funcionamiento especificados por el laboratorio de control. En este sistema de reacción, el control de las concentraciones de reactivo dentro del reactor pueden utilizarse como control primario en línea del índice de producto. Al añadir un controlador de índice de producto se eliminará W_{MSP} como grado de libertad, y lo sustituye mediante el punto de ajuste de índice del producto I_{SP} que es una variable de rendimiento.

El grado de libertad restante, W_{PSP} se elimina haciendo que el operador lo estipule como un valor fijo determinado de acuerdo con los resultados de operación, cuando la productividad es superior a la especificación mínima. Cuando la productividad desciende por debajo de la especificación. W_{PSP} se elimina introduciendo un controlador de productividad, que regule los puntos de ajuste de la concentración de producto y la velocidad de producción.

Modelos matemáticos En el análisis y el desarrollo de sistemas de control, es factible utilizar gran variedad de modelos matemáticos de proceso y ecuaciones de control. Usualmente, el término "modelo" se emplea para cubrir todos los tipos de modelos de proceso, descripciones de controladores y ecuaciones de control. La amplia variedad de los modelos utilizados se indica en varias subsecciones de esta sección de este *Manual del Ingeniero Químico* tituladas "Ecuaciones y modelos de control" bajo el título "Control de procesos por computadora",

y en "Temas adiciona
tos del control auton
operaciones unitaria
empíricos de proces
trolador", bajo el títu
La exactitud y la c
desarrollar un sisten
samiento, los objeti
rido para reforzar ta
tomando como base
basadas en resultad
combinación de res
máticos varían desd
de ecuaciones difer
La complejidad d
utilizando los objeti
gunas variables. Es
efectuar de un modo
depende del control
supervisión del per
analizando. Hay oc
del equipo de proc
longitud máxima d
ducirá la importanc
la complejidad del
de libertad antes cit
procesamiento en u
"Control de proceso
tas de proceso por c
Como ejemplo d
reactor de tanque a
el reactor recibe un
nes existentes en el
velocidad de reacci
ducir una razón co
tación a cualquier v
procesamiento pre
El desarrollo del
de los balances de

(Acumulación en el reactor)

En lo que respecta

El balance de mate

$(dx_A/d$

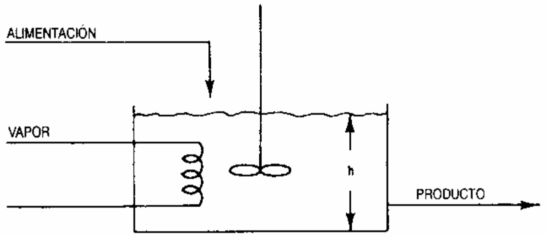


FIG. 22-192 Reactor químico.

y en "Temas adicionales sobre el control", bajo el título de "Fundamentos del control automático", y en los ejemplos citados en "Control de operaciones unitarias." Las técnicas para obtener algunos modelos empíricos de proceso más sencillos se especifican en "Ajustes del controlador", bajo el título "Fundamentos del control automático."

La exactitud y la complejidad de los modelos que se requieren para desarrollar un sistema de control dependen de los objetivos de procesamiento, los objetivos de control y el grado de automatización requerido para reforzar tales objetivos. Los modelos se pueden desarrollar tomando como base consideraciones teóricas o expresiones empíricas basadas en resultados experimentales. Por lo común, se trata de una combinación de resultados teóricos y empíricos. Los modelos matemáticos varían desde una simple ecuación algebraica hasta conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales simultáneas.

La complejidad de los modelos de proceso más elaborados se reduce utilizando los objetivos de procesamiento y control para eliminar algunas variables. Esta es una cuestión de criterio personal y se debe efectuar de un modo realista, sobre todo si la reducción de las variables depende del control en otra parte de la planta y no directamente de la supervisión del personal que opera la porción de la planta que se está analizando. Hay ocasiones en que un cambio en las especificaciones del equipo de proceso, como el espesor mínimo del aislamiento o la longitud máxima de la tubería entre depósito y punto de medición, reducirá la importancia de algunas variables. Otras técnicas para reducir la complejidad del modelo de proceso consisten en reducir los grados de libertad antes citados, y descomponer o desmembrar el sistema de procesamiento en unidades más pequeñas, como se ilustró en la parte "Control de procesos por computadora" bajo el título "Control de plantas de proceso por computadora."

Como ejemplo del desarrollo de un modelo matemático, véase el reactor de tanque agitado que se muestra en la figura 22-192, en donde el reactor recibe una muestra de los materiales A y B. En las condiciones existentes en el reactor, A se transforma en B con una constante de velocidad de reacción k, $A \xrightarrow{k} B$. El objetivo del procesamiento es producir una razón constante de B a A en el efluente, tomando la alimentación a cualquier velocidad que se produzca, mediante algún paso de procesamiento previo.

El desarrollo del modelo matemático emplea los conceptos básicos de los balances de masa y energía descritos:

$$\begin{pmatrix}\text{Acumulación en}\\ \text{el reactor}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Transferencia}\\ \text{al reactor}\end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix}\text{dentro del reactor}\\ \text{Generación}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{Transferencia}\\ \text{fuera del reactor}\end{pmatrix}$$

En lo que respecta a la figura 22-192, el balance global de material es

$$(dh/dt)(a\rho) = F_1 - F_2$$

El balance de material para el componente A es

$$(dx_A/dt)(a\rho h) = F_1x_{A1} - F_2x_A - kx_Aa\rho h$$

El balance de calor es

$$(dT/dt)(a\rho hC) = F_1C_1(T_1 - T_{ref}) - F_2C(T - T_{ref}) + kx_A\Delta H + a_sH_s(T_s - T)$$

Otras relaciones algebraicas que se aplican son

$$x_A + x_B = x_{A1} + x_{B1} = 1$$
$$k = k_0e^{-E_A/RT}$$
$$H_s = f(\rho, C, T)$$

En esas ecuaciones, a es el área de sección transversal del reactor, ρ la densidad, F el flujo de masa que entra o sale del reactor, h el nivel del fluido dentro del reactor, x_A y x_B la fracción peso de los componentes A y B, T la temperatura y C el calor específico. El subíndice 1 se refiere al material de alimentación y el subíndice 2 al efluente. La temperatura de vapor es T_s, el área de intercambio calorífico a_s y el coeficiente de transmisión H_s. ΔH es el calor de reacción para $A \rightarrow B$. k_0 es el factor de frecuencia de Arrhenius y E_A la energía de activación (véase la Sec. 4).

Las ecuaciones anteriores constituyen el modelo matemático del proceso. Las tres suposiciones obvias que se hicieron para reducir la cantidad de ecuaciones fueron: el depósito de reacción tiene un mezclado perfecto y la pérdida de calor hacia el medio, así como el calor generado por el mezclador, son despreciables. Es importante que se conozcan las suposiciones, para que se pueda tomar en cuenta su efecto en el rendimiento del sistema de control esperado.

Normalmente, el modelo matemático consta de ecuaciones diferenciales comunes y expresiones algebraicas. Las ecuaciones diferenciales pueden ser ecuaciones diferenciales parciales y las expresiones algebraicas pueden ser ecuaciones simultáneas no lineales.

La inspección de las ecuaciones diferenciales en el modelo sugerirá las estrategias de control que se deben estudiar. Por ejemplo, si la temperatura del reactor se va a controlar a un valor fijo, entonces, el tiempo de residencia y, a su vez, el nivel, se deben regular de tal manera que x_A/x_B del producto efluente satisfaga el estándar de calidad. El conocimiento que se derive respecto del proceso a través de la formulación de los modelos matemáticos permite, con frecuencia, sintetizar mejor las soluciones para la modificación coincidente del proceso y los problemas del sistema de control.

Simulación Las computadoras electrónicas se han convertido en instrumentos valiosos para analizar sistemas de control, gracias a la simulación. Cualquier proceso, con sus sistemas de control, se puede simular programando una computadora electrónica, de tal manera que contenga un modelo matemático del proceso y sistema de control. Este modelo matemático responde a las perturbaciones y los ajustes o modificaciones, en la misma forma que sucedería en un proceso real. No obstante, las respuestas se observan como variables de proceso o control automáticamente graficadas, impresiones de salida de datos de computadora digital o presentaciones de tubos de rayos catódicos en laboratorio, en lugar de hacerlo en planta.

La simulación de un proceso y su sistema de control se divide en dos partes: la preparación del modelo y el empleo de éste para estudiar el

control del proceso. Los conocimientos concernientes al desarrollo del proceso en el curso de la preparación de un modelo, que responde a las perturbaciones en la misma manera que dicho proceso, conducen, a menudo, a soluciones de los problemas de control, que difícilmente se pueden obtener mediante otras técnicas de análisis.

El desarrollo de una simulación de proceso se compone normalmente de cuatro etapas básicas:

1. Definición del proceso y derivación de un modelo matemático.
2. Determinación de los factores de escala del modelo y restricciones requeridas.
3. Programación de la computadora
4. Verificación y corrida de la simulación.

La simulación se debe considerar sólo como un modelo del proceso que representa, con limitaciones determinadas por factores como las suposiciones previstas para simplificar el modelo matemático, el detalle con que se describe el proceso, el cúmulo de conocimientos que se tienen sobre él, la experiencia del programador y el tamaño de la computadora.

El empleo de la simulación en el análisis de sistemas de control es fundamentalmente un procedimiento de prueba y error. Los resultados de otras técnicas de análisis de sistemas de control pueden contribuir al análisis proporcionando un punto de partida o lineamientos para analizar la simulación. El estudio de simulación se desarrolla ejecutando varios métodos de control, haciendo corridas de simulación para comprobar tales métodos y evaluando el rendimiento relativo de cada uno de ellos. En algunos casos, la simulación sirve para confirmar o demostrar técnicas de control desarrolladas por otros métodos.

La utilidad de la simulación se ve enriquecida por la escala del tiempo. Según los requisitos del problema, la simulación se puede realizar con velocidades mucho más rápidas o lentas que las que caracterizan al proceso real. Por ende, no se impone ninguna restricción al aplicar la simulación a procesos que funcionan con velocidades extremas, ya sean éstas lentas o veloces.

El análisis de un sistema de control mediante la simulación se caracteriza por la facilidad con que las corridas se ejecutan y se producen variaciones en los parámetros. La simulación tiene también la capacidad de computar variables que no serían accesibles con las mediciones directas en un proceso real, por ejemplo, la velocidad de reacción de un proceso químico. La simulación de un sistema de control por computadora permite la verificación experimental de ese género de variables computadas para ejercer un control junto con varios algoritmos de control, y configuraciones y ajustes del controlador. El curso del estudio de simulación depende de los criterios de control que se deban satisfacer.

La utilización de la simulación puede reducir la base fundamental de teoría de control que requiere el analista, aunque el costo es un incremento en los casos estudiados por simulación.

La simulación de proceso computarizada permite estudiar el control del proceso en un sistema en línea, es decir, realizar experimentos con el proceso más o menos de la misma manera como se haría en el caso real. Algunas ventajas de la simulación en relación con la experimentación en la planta son: se reducen los riesgos económicos y físicos comprendidos en el manejo del proceso real; la escala de tiempo se reduce o aumenta en comparación con el proceso real, según las necesidades del experimentador; es factible realizar desviaciones en las condiciones de procesamiento que quedan fuera del intervalo normal de operación, y se pueden hacer modificaciones del proceso programando cambios más que modificando equipos de proceso, lo cual permite estudiar la interacción del diseño de control y del proceso.

El laboratorio de simulación puede contener computadoras analógicas, una computadora digital o un sistema híbrido de computadora analógica-digital integrado.

Para evaluar las ventajas relativas de los diferentes tipos de computadora para simulación, es preciso tomar en cuenta los siguientes factores:

1. El tiempo de corrida de diferentes computadoras para alcanzar una simulación dada y el costo resultante.
2. El tiempo de programación y reprogramación para la ejecución inicial y modificaciones posteriores (en línea o fuera de línea) del programa.
3. La conveniencia y la importancia de la interacción hombre-máquina entre el operador y la computadora.

Simulación analógica La computadora electrónica analógica se ha convertido en un instrumento valioso para el análisis de sistemas de control por medio de la simulación (véase también la Sec. 2 de esta *Manual del Ingeniero Químico*). Cualquier proceso con su sistema de control se simula en una computadora analógica, conectando de tal manera los componentes de la computadora que se tenga una red eléctrica que represente los modelos matemáticos del proceso y el sistema de control. Una simulación de procesos de tipo analógico representa un proceso electrónico operable que funciona de manera similar al proceso real.

Esta operabilidad de la simulación analógica constituye una ventaja en que el realismo le permite al analista tener un conocimiento profundo del proceso, que es imposible obtener por otros medios. El analista tiene un sentido práctico de la operación y el control del proceso, con una respuesta instantánea a los ajustes o las modificaciones. Esta operación práctica tiene la ventaja adicional de que el simulador analógico se puede utilizar como dispositivo de adiestramiento para operadores de proceso, cuando se tengan nuevos procesos o nuevas técnicas de control.

Algunas características de la simulación con computadora analógica son:

1. Representación continua de las variables
2. Operación en paralelo de los componentes.
3. Grandes velocidades de operación.
4. El aumento del tamaño del problema requiere un incremento proporcional en el tamaño de la computadora, sin registrar aumentos en el tiempo de solución.
5. La exactitud y el intervalo dinámico están limitados por la capacidad de la medición física.
6. Integración continua
7. Dificultad para manejar y almacenar datos discretos.
8. La solución de un caso de simulación individual progresa con una velocidad proporcional a la escala de tiempo del sistema que se está estudiando.
9. Facilidad para incluir componentes del sistema de control real en la simulación.
10. Programación mediante la combinación manual de componentes.

Una simulación analógica es con frecuencia más fácil y rápida de llevar a cabo que una simulación digital. La simulación analógica es particularmente útil en el estudio de control de procesos en que las interacciones o las no linealidades del mismo dificultan su estudio analítico. Puesto que el tamaño máximo de simulación está limitado por el número de componentes de la computadora de que se dispone, el detalle hasta el cual se puede ejecutar la simulación es restringido también. Este puede llevar a aproximaciones que limitan la exactitud del análisis.

La computadora analógica está equipada con varios dispositivos lineales, como potenciómetros, amplificadores operacionales, sumadoras e integradores. Normalmente tienen una cantidad menor de dispositivos no lineales como multiplicadores, generadores de funciones y comparadores. Los generadores de funciones son fijos o variables. Los de tipo variable permiten generar casi cualquier función deseada.

Las computadoras analógicas existen en gran variedad de tamaños. Las unidades más pequeñas que existen en el mercado son útiles para simular circuitos de control individuales de tipo sencillo. Las instalaciones de mayor tamaño manejan modelos de unidades de procesamiento muy complejas en su totalidad.

El desarrollo del diagrama de conexión para una simulación comprende varias técnicas para transformar el modelo matemático en un circuito eléctrico. Si el operador tiene una buena experiencia en la simulación analógica, no es necesario formular explícitamente el modelo matemático en términos matemáticos estándares.

ción para la ejecución
uera de línea) del pro-

eracción hombre-má-

rónica analógica se ha
nálisis de sistemas de
bién la Sec. 2 de esta
oceso con su sistema
ica, conectando de tal
se tenga una red eléc-
l proceso y el sistema
analógico representa
de manera similar al

constituye una ventaja
conocimiento profun-
os medios. El analista
ntrol del proceso, con
ificaciones. Esta ope-
l simulador analógico
iento para operadores
o nuevas técnicas de

computadora analógi-

re un incremento pro-
gistrar aumentos en el

limitados por la capa-

discretos.
dual progresa con una
el sistema que se está

ema de control real en

nanual de componen-

más fácil y rápida de
nulación analógica es
procesos en que las
icultan su estudio ana-
ción está limitado por
de que se dispone, el
ón es restringido tam-
mitan la exactitud del

varios dispositivos li-
eracionales, sumado-
tidad menor de dispo-
adores de funciones y
fijos o variables. Los
función deseada.
variedad de tamaños.
ercado son útiles para
sencillo. Las instala-
unidades de procesa-

una simulación com-
elo matemático en un
a experiencia en la si-
plícitamente el mode-
res.

Para ilustrar la programación, considérese el siguiente modelo de proceso

$$(d^2y/dt^2) + a_1(dy/dt) + a_2y = kx$$

Este modelo representa un proceso de segundo orden, cuya entrada y salida son x y y, respectivamente, y cuya función de transferencia es

$$G(s) = k/(s^2 + a_1s + a_2)$$

La transformación del modelo en las *variables de estado* $y_1 = y$ y $y_2 = dy/dt$, genera dos ecuaciones diferenciales simultáneas de primer orden.

$$dy_1/dt = y_2 \qquad (22\text{-}41)$$
$$dy_2/dt = kx - a_1y_2 - a_2y_1$$

Las mediciones de proceso tienen por lo común unidades de gasto, composición, grados, etc., mientras que la salida de la simulación analógica se da en volts. Un intervalo usual es, por ejemplo, de −10 a + 10 V. Definiendo las variables reducidas cuyo intervalo es −1 a + 1, que corresponde a −10 y + 10 V, se simplifica la conversión de unidades. En las ecuaciones (22-41), para determinar los valores absolutos máximo y mínimo de x, y_1 y y_2, defínanse las variables reducidas $\bar{x}$, $\bar{y}_1$ y $\bar{y}_2$, en la forma

$$\bar{x} = \frac{x - |x_{\text{mín}}|}{|x_{\text{máx}}| - |x_{\text{mín}}|}$$

Al resolver estas expresiones de variable reducida para x, y_1, y y_2, y haciendo las sustituciones correspondientes en las ecuaciones (22-35).

$$\frac{d\bar{y}_1}{dt} = \frac{|y_{2\text{mín}}| + (|y_{2\text{máx}}| - |y_{2\text{mín}}|)}{|y_{1\text{máx}}| \quad |y_{1\text{mín}}|}$$

$$\frac{d\bar{y}_2}{dt} = \frac{k|x_{\text{mín}}| - a_1|y_{2\text{mín}}| - a_2|y_{1\text{m}}}{|y_{2\text{máx}}| -}$$

$$\frac{a_2(|y_{1\text{máx}}| - |y_{1\text{mín}}|}{|y_{2\text{max}}| - |y_{2\text{mín}}|}\bar{y}_2 - a$$

Puesto que normalmente existe una diferencia en la escala de tiempo a la que opera el proceso y a la que funciona el simulador, el *escalamiento del tiempo* se logra definiendo el tiempo de simulador en segundos $\bar{t}$ en función del tiempo de procesos t. Así pues $\bar{t} = \beta t$, de donde,

$$\frac{d\bar{y}_1}{d\bar{t}} = \frac{1}{\beta}\frac{d\bar{y}_1}{dt} \qquad \text{y} \qquad \frac{d\bar{y}_2}{d\bar{t}} = \frac{1}{\beta}\frac{d\bar{y}_2}{dt}$$

Las magnitudes de los dos coeficientes constantes de las expresiones para $d\bar{y}_1/dt$ y $d\bar{y}_2/dt$ indican con frecuencia un valor apropiado para β. Usualmente, β se elige de tal modo que los ajustes del potenciómetro sean mayores que el 10% de la escala y las ganancias del amplificador menores que 10.

Las ecuaciones integrales que se deben resolver son:

$$\bar{y}_1(\bar{t}) = \bar{y}_1(0) + \int_0^{\bar{t}} \frac{1}{\beta}\frac{d\bar{y}}{dt}\,d\bar{t}$$

$$\bar{y}_2(\bar{t}) = \bar{y}_2(0) + \int_0^{\bar{t}} \frac{1}{\beta}\frac{d\bar{y}_2}{dt}\,d\bar{t}$$

La solución se obtiene utilizando el circuito de computadora analógica que se ilustra en la figura 22-193. En esta figura, los ajustes del potenciómetro son:

$$P1 = \bar{y}_2(0), \text{ la condición inicial para } \bar{y}_2$$

$$P2 = \frac{|x_{\text{mín}}| - a_1|y_{2\text{mín}}| - a_2|y_{1\text{mín}}|}{\beta(|y_{2\text{máx}}| - |y_{2\text{mín}}|)}$$

$$P3 = \frac{|x_{\text{máx}}| - |x_{\text{mín}}|}{\beta(|y_{2\text{máx}}| - |y_{2\text{mín}}|)}$$

$$P4 = \frac{a_2}{\beta}\frac{|y_{1\text{máx}}| - |y_{1\text{mín}}|}{|y_{2\text{máx}}| - |y_{2\text{mín}}|}$$

$$P5 = a_1/\beta$$

$$P6 = \bar{y}_1(0), \text{ la condición inicial para } \bar{y}$$

$$P7 = \frac{|y_{2\text{mín}}|}{\beta(|y_{1\text{max}}| - |y_{1\text{mín}}|)}$$

$$P8 = \frac{|y_{2\text{máx}}| - |y_{2\text{mín}}|}{\beta(|y_{1\text{max}}| - |y_{1\text{mín}}|)}$$

Simulación digital Las computadoras digitales son capaces de ejecutar operaciones aritméticas y lógicas con velocidades extremas, y de almacenar muchos programas y grandes cantidades de datos (véase también la Sec. 2 de este *Manual del Ingeniero Químico*). Son superiores a las computadoras analógicas cuando la naturaleza de la tarea que se va a desempeñar requiere estas características específicas. No obstante, las computadoras digitales pueden ser ineficientes para resolver ciertas clases de problemas que comprenden ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. El costo de estas ineficiencias decrece al aumentar la velocidad de las generaciones más recientes de computadora.

Algunas características de la simulación en computadoras digitales son:

1. Las variables se representan por medio de números discretos.

2. Las operaciones se ejecutan en secuencia.

3. La velocidad de operación es más lenta que en la analógica.

4. Al aumentar el tamaño del problema se necesita un incremento en el tamaño de la memoria y el tiempo de solución.

5. La exactitud y el intervalo de la dinámica se pueden ampliar a cualquier grado deseado.

6. La integración se hace por cálculo finito diferencial.

7. Es fácil almacenar y manejar datos discretos.

8. Por lo común, no hay correspondencia entre la velocidad de solución y la velocidad del sistema estudiado.

9. Es difícil incluir parte del sistema real.

10. Se programa mediante un lenguaje de computadora.

La programación de una computadora digital para simulación se realiza, casi siempre, utilizando un lenguaje general de tipo científico, por ejemplo, el FORTRAN o el ALGOL, o bien, recurriendo a un lenguaje de programación especializado desarrollado específicamente para la simulación.

Los lenguajes de simulación digital para fines generales se diseñan para programar computadoras digitales, con el fin de simular gran variedad de sistemas. Hay básicamente dos categorías del lenguaje de simulación para fines generales: las que se emplean para sistemas continuos y las de eventos discretos.

Los lenguajes de simulación digital para fines especiales se diseñan de tal modo que los ingenieros de un campo especializado puedan escribir un programa utilizando un vocabulario de términos y definiciones relacionados directamente con el sistema que se desea simular. Por ejemplo, el ECAP (Electronic Circuit Analysis Program) para análisis de circuitos eléctricos, permite utilizar ca de estado estacionario, cc de estado estacionario, así como respuestas transitorias de circuitos que se obtienen por simulación digital.

Los lenguajes de simulación para sistemas continuos, desarrollados para simular sistemas dinámicos, se han derivado de técnicas de programación que se han utilizado desde hace mucho tiempo en la computación analógica. Varios de ellos emplean la notación del tipo de diagrama de bloques y le proporcionan al analista facilidades que previamente estaban sólo a disposición de los usuarios de las computadoras analógicas. Un programa desarrollado mediante el empleo de este tipo de lenguaje de simulación puede tener una corrida más lenta que si se hubiera desarrollado con un lenguaje científico de programación. Sin embargo, su preparación requiere menos esfuerzos. Debido al nú-

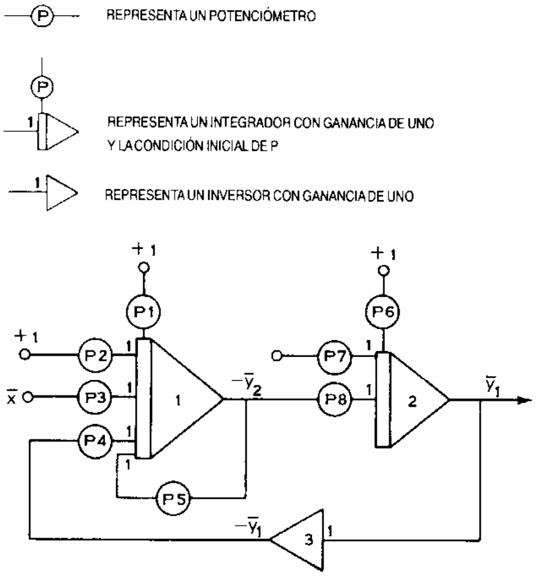


FIG. 22-193 Programa de computadora analógica que simula el proceso con tiempo y magnitud a escala representado por la ecuación (22-35).

mero de lenguajes de programación para la simulación dinámica continua que se han desarrollado en sólo unos cuantos años, la empresa Simulation Councils, Inc. (sociedad profesional dedicada a la simulación) estableció un comité con el fin de formular normas para programar simulaciones. Uno de los resultados del trabajo de este comité fue un nuevo programa de simulación digital, el CSSL (continuous systems simulation language), que contiene características que se encuentran en más de 20 lenguajes antiguos.

Se ha registrado una gran proliferación de lenguajes de simulación de eventos discretos, y entre los más conocidos están SIMSCRIPT y TPSS.

Simulación híbrida Las computadoras híbridas que se emplean para simular controles de proceso consisten en una o más computadoras analógicas y una computadora digital para fines generales, enlazadas mediante una entrecara especial para obtener un solo sistema de computación, como se ilustra en la figura 22-194. El enlace de interconexión incluye las siguientes funciones:

1. Equipo de conversión analógica a digital de canales múltiples: transforma señales analógicas en datos digitales.

2. Equipo de conversión digital a analógica de canales múltiples: transforma datos digitales en señales analógicas.

3. Enlace lógico: desempeña la transferencia bilateral de información lógica.

4. Enlace del sistema de supervisión y control: permite controlar la computadora analógica y digital por medio de señales que se originan en cualquiera de ambas máquinas.

La computadora híbrida sumamente especializada, se está aplicando a la solución de problemas de ingeniería en las industrias de procesos que, hasta ahora, parecían demasiado costosos e imprácticos. En general, el método que está siguiendo la ingeniería para resolver un problema de proceso o control utilizando la simulación híbrida no se diferencia del que se siguió para la simulación analógica o digital. La ventaja de utilizar la computadora híbrida reside en la capacidad que tiene el analista para ejecutar cientos o varios cientos de miles de soluciones completas en un tiempo relativamente corto, evaluar varios patrones de control completamente diferentes con muy poco esfuerzo adicional, y resolver problemas que comprenden modelos matemáticos complejos que no serían prácticos o factibles mediante otras técnicas.

La máquina híbrida es capaz de retener la característica "práctica" de la simulación analógica, en la cual el operador observa el comportamiento del sistema más que la simple ejecución de los cálculos. Asimismo, se puede lograr la automatización completa del problema cuando la porción digital del sistema híbrido maneja el control de operación de la computadora analógica, decide los ajustes del potenciómetro, controla los dispositivos de salida, cambia las condiciones iniciales de corrida a corrida y termina automáticamente cuando se han procesado todos los datos deseados.

La computadora híbrida totalmente integrada aprovecha tanto las características de las computadoras analógicas como las de las digitales en su capacidad para:

1. Resolver ecuaciones diferenciales parciales con alta velocidad, por medio de métodos que utilizan la integración continua en la máquina analógica y las funciones de almacenamiento y reproducción de la máquina digital.

2. Resolver problemas de optimización dinámica que requieren la resolución iterativa de ecuaciones diferenciales de estado y conjuntas, y el almacenamiento de resultados iterativos intermedios.

3. Secuencias de preprogramación de soluciones que se obtendrán con alta velocidad por medio de la computadora analógica y que la digital registrará o pondrá en ejecución.

4. El almacenamiento en la computadora digital de datos numéricos que utilizará la computadora analógica en el ajuste de datos, en problemas de identificación de parámetros, la solución de modelos o en una función de procesamiento de datos.

5. La programación de la computadora analógica, la determinación de atenuadores y la ejecución de operaciones de verificación en forma automática a partir de la digital.

COSTOS DE IN

La instrumentaci
es un área muy an
la mayor parte de
presión, presión d
Esta subsección s
sicos para registr
sentan aquí se re
adquisición pued
establecidos, a c
dad de control y c
Instrumentac
proceso que se m
ciones en proces
los compresores
En la tabla 22-16
de medición más
Los costos de
de medición real
electrónicos incl
nica adecuada. E
equipo de comp
bilización y med
Instrumenta
del proceso se in

o, evaluar varios pa-
muy poco esfuerzo
a modelos matemá-
bles mediante otras

cterística "práctica"
observa el compor-
de los cálculos. Así-
pleta del problema
ja el control de ope-
justes del potenció-
las condiciones ini-
ente cuando se han

aprovecha tanto las
mo las de las digita-

con alta velocidad,
continua en la má-
o y reproducción de

ica que requieren la
estado y conjuntas,
medios.
es que se obtendrán
analógica y que la

de datos numéricos
de datos, en proble-
le modelos o en una

a, la determinación
rificación en forma

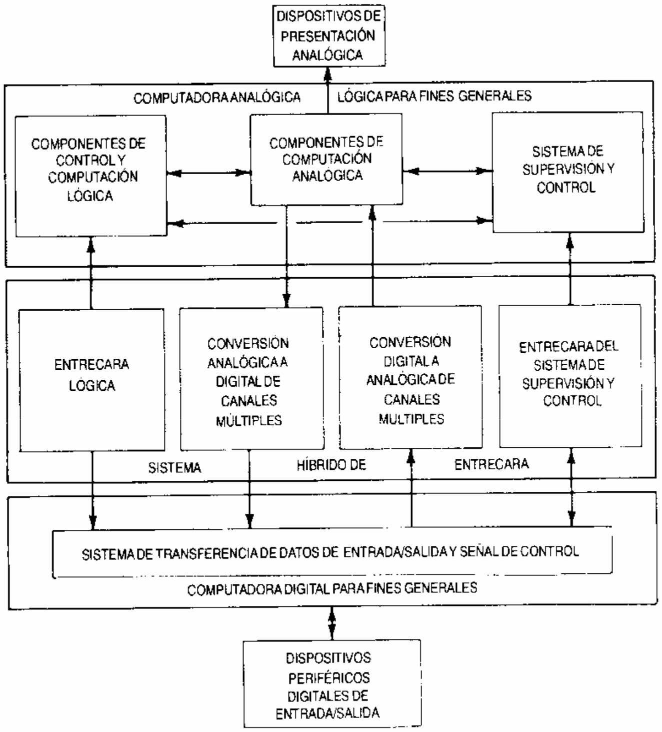


FIG. 22-194 Entrecara usual de computadora híbrida, que permite conectar una computadora analógica con una digital para formar una sola máquina híbrida.

COSTOS DE INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación que se utiliza en el control de procesos químicos es un área muy amplia que cuenta con muchas variables; sin embargo, la mayor parte del control se basa en la medición de la temperatura, presión, presión diferencial y composición de la corriente bajo control. Esta subsección se dedica al análisis del costo de los instrumentos básicos para registro y control de estas variables. Los costos que se presentan aquí se refieren a listas de precios de 1977. El costo real de adquisición puede variar hasta un punto que se salga de los intervalos establecidos, a consecuencia de las diferencias en calidad, complejidad de control y otras características de los instrumentos.

Instrumentación en el punto de medición Los instrumentos de proceso que se montan en el punto de medición tienen muchas aplicaciones en procesos simples y en ubicaciones remotas; tal es el caso de los compresores y las estaciones de bombeo y terminales de producto. En la tabla 22-16 se presentan los instrumentos montados en el punto de medición más utilizados en todos los procesos.

Los costos de los instrumentos neumáticos incluyen el dispositivo de medición real con el instrumento. Los costos de los instrumentos electrónicos incluyen un convertidor para producir una señal electrónica adecuada. En cada caso, el costo presentado cubre los costos del equipo de computación (*hardware*) en los puntos de control de sensibilización y medición.

Instrumentación en un cuarto de control Cuando la complejidad del proceso se incrementa, se llega a un punto en que el control y medición total del proceso se concentra en un cuarto de control. En la tabla 22-17 se presentan los costos para los instrumentos básicos de un cuarto de control.

TABLA 22-16 Instrumentación de un circuito sencillo, montado en el lugar de medición

Tipo de instrumento	Neumático, dls.	Electrónico, dls.
Temperatura		
Indicador	300–700	600–1500
Registrador	600–1100	1150–1650
Controlador	600–1800	1700–2350
Registrador-controlador	650–1850	1700–2450
Presión		
Indicador	40–200	720–1830
Registrador	450–1490	1300–1860
Indicador-controlador	470–2300	1910–2700
Registrador-controlador	1000–2400	1930–2700
Medición de flujo por presión diferencial		
Indicador	560–1520	750–2000
Registrador	790–1550	1390–2100
Indicador-controlador	500–1000	1700–3000
Registrador-controlador	800–2000	1900–3000
Análisis cromatográfico de la corriente	5000–8500	7000–11 000

TABLA 22-17 Instrumentación para el control centralizado

Tipo de instrumento	Intervalo de costos unitarios, dólares en 1977 — Neumático, dólares	Intervalo de costos unitarios, dólares en 1977 — Electrónico, dólares
Registrador de punto múltiple (12 puntos)		1100–4000
Registradores-controladores		
Una pluma	460–580	730–1400
Dos plumas	650 900	1140–2000
Tres plumas	820–1200	1500–2300
Cuatro plumas	1000–1400	
Controladores programables		
Control de relevador; I/O puntos = 250/250		1000 10,000
Control de proceso básico sin equipo auxiliar de soporte; I/O puntos = 500/500		8000–15 000
Controladores de microprocesador		
Control de procesos con equipo auxiliar de soporte; I/O puntos = 500/500		10 000–25 000
Control de proceso múltiple con equipo completo de soporte; I/O puntos = 15 000/15 000		25 000–150 000

NOTA: Estos costos no incluyen los equipos de generación o conversión de señal. Los precios son para instrumentos básicos hasta opciones completas.

Control de la planta por computadora El tercer nivel de instrumentación que se utiliza en la actualidad se aplica al control de planta por computadora mediante la supervisión y control por computadora de los instrumentos individuales en el cuarto de control. Un monitor de 50 circuitos tendrá un costo que oscila entre 85 000 y 175 000 dólares. La diferencia de precio se debe a la magnitud de los requisitos de programas (*software*), ya que el costo del equipo de computación (*hardware*) permanece constante. La computadora se expande por adición de otra unidad a este costo.

Análisis de la composición del proceso El análisis de composición es una variable que se emplea para el control del proceso químico y para establecer la calidad de los productos. La calidad del gas puede determinarse mediante instrumentos de gravedad específica, que tienen un costo entre 1750 y 8000 dólares. El poder calorífico del gas puede determinarse mediante calorímetros, cuyo costo oscila entre 6000 y 13 000 dólares.

Los densímetros que efectúan su medición en las corrientes líquidas tienen un costo entre 3000 y 8000 dólares, dependiendo del método analítico que se emplea y su exactitud. Estos instrumentos transmiten una señal para su control y registro.

El análisis cromatográfico de corrientes de proceso costará de 7500 a 15 000 dólares, dependiendo del número de corrientes analizadas. Con la adición de un microcomputador, cuyo costo oscila entre 10 000 y 13 000 dólares, es posible convertir la composición en datos como poder calorífico, densidad y flujo de masa.

Albert S. Krisher
Company; member,
of Corrosion Engin
Materials, Electroc

Oliver W. Siebe
Company; Adjunct
Member, American
Engineers, Nationa
American Society f
The Plastics Indust

LA C

Corrosión por fluidos
Corrosión por fluidos:
Materiales metálico
Materiales no metál
Corrosión por fluidos:
Corrosión por picad
Corrosión por griet
Celda de concentra
Corrosión galvánic
Corrosión intergran
Fractura de corrosi
Corrosión por meta
Erosión . . . . .
Corrosión por choq
Corrosión por fatig
Erosión por cavitac
Corrosión por roza
Ataque por hidróge
Corrosión por fluido:
Corrosión grafítica
Corrosión separati

*Parte del material d
preparó el Sr. R. B. Nor
aportaciones.

Materiales de construcción*

Albert S. Krisher, *B.S. Ch.E., Oklahoma State University; Senior Fellow, Monsanto Company; member, American Institute of Chemical Engineers, National Association of Corrosion Engineers, American Society of Metals, American Society for Testing and Materials, Electrochemical Society*

Oliver W. Siebert, *B.S. M.E., Washington University; Senior Fellow, Monsanto Company; Adjunct Professor of Mechanical Engineering, Washington University; Member, American Society of Mechanical Engineers, American Institute of Chemical Engineers, National Association of Corrosion Engineers, American Welding Society, American Society for Testing and Materials, American Society of Metals, Society of The Plastics Industries, Electrochemical Society*

LA CORROSIÓN Y SU CONTROL

Corrosión por fluidos 23-3
Corrosión por fluidos: General 23-3
Materiales metálicos 23-3
Materiales no metálicos 23-3
Corrosión por fluidos: Localizada 23-3
Corrosión por picadura 23-3
Corrosión por grieta 23-3
Celda de concentración de oxígeno 23-3
Corrosión galvánica 23-3
Corrosión intergranular 23-4
Fractura de corrosión por esfuerzo 23-4
Corrosión por metales líquidos 23-5
Erosión 23-5
Corrosión por choque 23-5
Corrosión por fatiga 23-5
Erosión por cavitación 23-5
Corrosión por rozamiento 23-5
Ataque por hidrógeno 23-5
Corrosión por fluido: Estructural 23-6
Corrosión grafítica 23-6
Corrosión separativa o ataque de aleaciones 23-6
Deszincificación 23-6
Corrosión biológica 23-6
Factores que influyen en la corrosión 23-6
pH de la solución 23-6
Agentes oxidantes 23-6
Temperatura 23-7
Velocidad 23-7
Películas 23-7
Otros efectos 23-7
Ataque a alta temperatura 23-8
Propiedades físicas 23-8
Propiedades mecánicas 23-8
Resistencia a la corrosión 23-8
Cómo combatir la corrosión 23-8
Selección de materiales 23-8
Diseño adecuado 23-8
Modificación del ambiente 23-8
Inhibidores 23-9
Protección catódica 23-9
Protección anódica 23-9
Recubrimientos y forros 23-9
Acero recubierto de vidrio 23-9

*Parte del material de esta sección fue tomado de la quinta edición, la cual preparó el Sr. R. B. Norden, a quien expresamos nuestro reconocimiento por sus aportaciones.

Recubrimientos metálicos para ambientes moderados . . . 23-10
Métodos para probar la corrosión . . . 23-10
Pruebas de corrosión en laboratorio . . . 23-10
Piezas para pruebas . . . 23-10
Aparatos . . . 23-11
Temperatura de la solución . . . 23-11
Aireación de la solución . . . 23-12
Velocidad de la solución . . . 23-12
Volumen de la solución . . . 23-12
Método de soporte de muestras . . . 23-12
Duración de la prueba . . . 23-12
Limpieza de muestras después de la prueba . . . 23-12
Evaluación de resultados . . . 23-13
Efecto de las variables sobre las pruebas de corrosión . . . 23-13
Pruebas de corrosión en plantas . . . 23-13
Muestras para prueba . . . 23-14
Resultados de pruebas . . . 23-15
Nuevos métodos de prueba de corrosión . . . 23-15
Método de resistencia eléctrica . . . 23-15
Método de polarización lineal . . . 23-15
Pruebas electroquímicas de corrosión . . . 23-15
Pruebas de fractura de corrosión por esfuerzo . . . 23-16
Factores económicos en la selección de materiales . . . 23-16

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Guía para datos tabulados . . . 23-16
Normas y especificaciones de materiales . . . 23-17
Aleaciones y metales ferrosos . . . 23-17
Acero . . . 23-17
Aceros de baja aleación . . . 23-17
Hierros colados . . . 23-17
Hierros colados de aleación . . . 23-41
Acero inoxidable . . . 23-42
Aleaciones medias . . . 23-43
Aleaciones altas . . . 23-44
Aleaciones y metales no ferrosos . . . 23-47
Níquel y sus aleaciones . . . 23-47
Aluminio y sus aleaciones . . . 23-47
Cobre y sus aleaciones . . . 23-47
Plomo y sus aleaciones . . . 23-47
Titanio . . . 23-47
Circonio . . . 23-49
Tantalio . . . 23-49
Materiales inorgánicos no metálicos . . . 23-49
Vidrio y acero vidriado . . . 23-49
Porcelana y loza . . . 23-50
Construcción de ladrillos . . . 23-50
Cemento y concreto . . . 23-50
Tierras . . . 23-52
Materiales orgánicos no metálicos . . . 23-52
Materiales plásticos . . . 23-52
Termoplásticos . . . 23-52
Plásticos fijos termoestables o termofijos . . . 23-53
Caucho y elastómeros . . . 23-55
Asfalto . . . 23-55
Carbono y grafito . . . 23-56
Madera . . . 23-56

MATERIALES PARA ALTAS Y BAJAS TEMPERATURAS

Metales para bajas temperaturas . . . 23-56
Aceros inoxidables . . . 23-62
Acero al níquel . . . 23-62
Aluminio . . . 23-62
Cobre y sus aleaciones . . . 23-62
Materiales para altas temperaturas . . . 23-63
Metales . . . 23-63
Atmósferas de hidrógeno . . . 23-67
Corrosión por azufre . . . 23-67
Halógenos (Cl_2 y HCl, calientes y secos) . . . 23-67
Refractarios . . . 23-67
Aislamiento interno . . . 23-67
Ladrillos refractarios . . . 23-68
Revestimientos aislantes de fibras de cerámica . . . 23-71
Refractarios monolíticos moldeables . . . 23-72

REFERENCIAS GENERALE
Evaluation, McGraw-Hi
9th ed. vols. 1, 2 and 3, A
1980; other volumes in p
National Association of
sociates, Guidelines for C
Stainless Steels and Nick
logy Institute of the Chem
Corrosion Passivity an
rosion and Oxidation c
Greene, Corrosion Engi
enbach, Materials Selec
Hamner (comp.), Corros
of Corrosion Engineers,
vey: Non-Metals Sectio
ton, 1975. Hanson y P
Reading, Mass., 1965. I
Alloys, Reinhold, New
vols. 1-11, American So
(ed.), Engineering Ma
Shreir, Corrosion, Geor
and Prevention, McGr
Handbook, Wiley, New
2d ed., Wiley, New Yor
Engineer, Hart Publishi
Society for Metals, Cle

CORROSIÓN P

En la selección de m
determinado, es imp
terísticas del sistem
tores que pueden inf
peculiares para cada
aquí un conjunto de
tuaciones.

Los materiales c
sideración importa
mientos sobre las c
materiales cuando s

A falta de inform
ticular de condicion
blemente buena a pa
en un ambiente mu
lizar con cierta rese
datos a la selección
modo requerirán un
tomando en conside

CORROSIÓN F

Materiales met
den a unirse químic
para formar compu
la naturaleza. Cuar
el compuesto que s
dice que la superfic

La corrosión es u
formas. Por lo com
noce como corrosi

. . . . 23-47
. . . . 23-47
. . . . 23-47
. . . . 23-47
. . . . 23-47
. . . . 23-49
. . . . 23-49
. . . . 23-49
. . . . 23-49
. . . . 23-50
. . . . 23-50
. . . . 23-50
. . . . 23-52
. . . . 23-52
. . . . 23-52
. . . . 23-52
. . . . 23-53
. . . . 23-55
. . . . 23-55
. . . . 23-56
. . . . 23-56

MPERATURAS
. . . . 23-56
. . . . 23-62
. . . . 23-62
. . . . 23-62
. . . . 23-62
. . . . 23-63
. . . . 23-63
. . . . 23-67
. . . . 23-67
. . . . 23-67
. . . . 23-67
. . . . 23-67
. . . . 23-68
. . . . 23-71
. . . . 23-72

LA CORROSIÓN Y SU CONTROL

REFERENCIAS GENERALES: Ailor (ed.), *Handbook on Corrosion Testing and Evaluation,* McGraw-Hill, New York, 1971. Bordes (ed.), *Metals Handbook,* 9th ed. vols. 1, 2 and 3, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978-1980; other volumes in preparation. Dilon (ed.), *Process Industries Corrosion,* National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1975. Dillon and associates, *Guidelines for Control of Stress Corrosion Cracking of Nickel-Bearing Stainless Steels and Nickel-Base Alloys,* MTI Manual No. 1, Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Columbus, 1979. Evans, *Metal Corrosion Passivity and Protection,* E. Arnold, London, 1940. Evans, *Corrosion and Oxidation of Metals,* St. Martin's, New York, 1960. Fontana y Greene, *Corrosion Engineering,* 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1978. Gackenbach, *Materials Selection for Process Plants,* Reinhold, New York, 1960. Hamner (comp.), *Corrosion Data Survey: Metals Section,* National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1974. Hamner (comp.), *Corrosion Data Survey: Non-Metals Section,* National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1975. Hanson y Parr, *The Engineer's Guide to Steel,* Addison-Wesley, Reading, Mass., 1965. LaQue y Copson, *Corrosion Resistance of Metals and Alloys,* Reinhold, New York, 1963. Lyman (ed.), *Metals Handbook,* 8th ed., vols. 1-11, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961-1976. Mantell (ed.), *Engineering Materials Handbook,* McGraw-Hill, New York, 1958. Shreir, *Corrosion,* George Newnes, London, 1963. Speller, *Corrosion—Causes and Prevention,* McGraw-Hill, New York, 1951. Uhlig (ed.), *The Corrosion Handbook,* Wiley, New York, 1948. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control,* 2d ed., Wiley, New York, 1971. Wilson y Oates, *Corrosion and the Maintenance Engineer,* Hart Publishing, New York, 1968. Zapffe, *Stainless Steels,* American Society for Metals, Cleveland, 1949.

CORROSIÓN POR FLUIDOS

En la selección de materiales de construcción para un sistema fluido determinado, es importante tomar en consideración primero las **características del sistema**, prestando una atención especial a todos los factores que pueden influir en la corrosión. Puesto que esos factores serán peculiares para cada sistema particular, es impráctico tratar de ofrecer aquí un conjunto de reglas empíricas seguras que cubran todas las situaciones.

Los **materiales** con que se construirá el sistema son la segunda consideración importante. Por consiguiente, es esencial tener conocimientos sobre las características y el comportamiento general de los materiales cuando se exponen a ciertos ambientes.

A falta de información real sobre la corrosión, para un conjunto particular de condiciones del fluido, sería posible una selección razonablemente buena a partir de datos basados en la resistencia de materiales en un ambiente muy similar. No obstante, esos datos se tienen que utilizar con cierta reserva. Una buena práctica exige la aplicación de esos datos a la selección preliminar. Los materiales seleccionados de ese modo requerirán un estudio más amplio en el sistema fluido que se esté tomando en consideración.

CORROSIÓN POR FLUIDOS: GENERAL

Materiales metálicos Los materiales puros y sus aleaciones tienden a unirse **químicamente** con los elementos de un medio corrosivo para formar compuestos estables similares a los que se encuentran en la naturaleza. Cuando se producen pérdidas de metales de ese modo, el compuesto que se forma se denomina producto de la corrosión y se dice que la superficie del metal está corroída.

La corrosión es un fenómeno complejo que puede tomar una o varias formas. Por lo común, se limita a la superficie del metal y esto se conoce como corrosión general; pero hay veces en que tiene lugar a lo largo de la superficie, límite de los granos u otras líneas que muestran debilidad debido a diferencias en la resistencia a los ataques o una acción electrolítica local.

En la mayor parte de los sistemas acuosos, la reacción de corrosión se divide en una porción anódica y otra catódica, que se producen simultáneamente en puntos discretos sobre las superficies metálicas. Se puede generar un flujo de electricidad de las zonas anódicas a las catódicas mediante celdas locales desarrolladas ya sea en una superficie metálica simple (por diferencias locales de punto a punto sobre la superficie) o entre metales distintos.

Materiales no metálicos Como se indicó, la corrosión de los metales se aplica específicamente a los ataques químicos o electroquímicos. El deterioro de los plásticos y otros materiales no metálicos, propensos al hinchamiento, el resquebrajamiento, el agrietamiento, el ablandamiento, etc., es esencialmente de naturaleza **fisicoquímica** más que electroquímica. Los materiales no metálicos se pueden deteriorar con rapidez cuando se exponen a un ambiente dado, o bien, en el otro extremo, se pueden ver prácticamente poco afectados. En ciertas condiciones, un material no metálico puede tener evidencias de deterioro gradual; sin embargo, raramente resulta posible evaluar su resistencia química sólo con mediciones de la pérdida de peso, como se hace en general para los metales.

CORROSIÓN POR FLUIDOS: LOCALIZADA

Corrosión por picadura Las picaduras son una forma de corrosión que se desarrolla en zonas muy localizadas de una superficie metálica. Esto da como resultado el desarrollo de cavidades o agujeros, que pueden ir desde las cavidades profundas y de diámetro pequeño a las depresiones relativamente poco profundas. Ejemplos de formación de picaduras: aluminio y aleaciones de acero inoxidable en soluciones acuosas que contengan cloruros. A veces resultan útiles los **inhibidores** para evitar que se formen picaduras.

Corrosión por grieta Este tipo de corrosión se produce en una grieta formada por el contacto con otra pieza del mismo u otro metal o con un material no metálico. Cuando ocurre esto, la intensidad del ataque suele ser mayor que en las zonas circundantes de la misma superficie.

Este tipo de corrosión se puede presentar debido a una deficiencia de oxígeno en la grieta, cambios de acidez, acumulación de iones o agotamiento de un inhibidor.

Celda de concentración de oxígeno La celda de concentración de oxígeno es electrolítica y, en ella, la fuerza impulsora que causa la corrosión resulta de una diferencia en la cantidad de oxígeno en solución en un punto, en comparación con otro. La corrosión se acelera donde la concentración de oxígeno es menor como, por ejemplo, en una caja prensaestopas o bajo empaques. Esta forma de corrosión se produce también bajo sustancias sólidas que se pueden depositar sobre una superficie metálica y que origina una barrera que impide que le llegue oxígeno. Para resolver esta situación se debe recurrir al rediseño o al cambio de las condiciones mecánicas.

Corrosión galvánica La corrosión galvánica tiene una velocidad de corrosión por encima de lo normal, que se asocia con el flujo de corriente a un metal menos activo (cátodo) en contacto con un metal más activo (ánodo) en el mismo ambiente. En la tabla 23-1 se muestra la serie **galvánica** de varios metales. Esta tabla se tiene que emplear con cuidado, puesto que se presentan excepciones a esta serie en el uso real. Sin embargo, como regla general, cuando se utilizan metales distintos en contacto unos con otros y se exponen a una solución conduc-

TABLA 23-1 Serie galvánica de metales y aleaciones

Extremo corroído (anódico, o menos noble)
Magnesio
Aleaciones de magnesio
Zinc
Aleaciones de aluminio
Aluminio
Alclad
Cadmio
Acero dulce
Hierro colado
Ni-Resistente
Inoxidable de 13% de cromo (activo)
Soldadura de 50-50 plomo-estaño
Inoxidable 18-8 tipo 304 (activo)
Inoxidable 18-8-3 tipo 316 (activo)
Plomo
Estaño
Metal Muntz
Latón naval
Níquel (activo)
Inconel 600 (activo)
Latón amarillo
Latón admiralty
Bronce de aluminio
Latón rojo
Cobre
Bronce de silicio
Cuproníquel 70-30
Níquel (pasivo)
Inconel 600 (pasivo)
Monel 400
Inoxidable 18-8 tipo 304 (pasivo)
Inoxidable 18-8-3 tipo 316 (pasivo)
Plata
Grafito
Oro
Platino
Extremo protegido (catódico, o más noble)

tora de la electricidad, se deben seleccionar combinaciones de metales muy próximos dentro de lo posible, en la serie galvánica. En general, el acoplamiento de dos metales muy separados en esa serie producirá un ataque acelerado en el metal más activo. No obstante, con mucha frecuencia, las películas protectoras de óxido y otros efectos tenderán a reducir la corrosión galvánica. Por supuesto, la corrosión galvánica se puede evitar **aislando** los metales uno del otro. Por ejemplo, cuando se atornillan placas juntas, se pueden utilizar arandelas de plástico diseñadas especialmente.

Pueden establecerse asimismo diferencias de potencial que generen celdas de tipo galvánico en una sola especie de metal por diferencias de temperatura, velocidad, o concentración (véase la subsección "Corrosión por grieta").

Los **efectos por el área** en la corrosión galvánica son muy importantes. Una relación de área desfavorable es la de un cátodo grande y un ánodo pequeño. La corrosión del ánodo puede ser de 100 a 1000 veces mayor que si las dos áreas fueran iguales. Ésta es la razón por la cual los aceros inoxidables son propensos a picarse con rapidez en algunos ambientes. Los remaches de acero en una placa de cobre se corroerán mucho más que una placa de acero con remaches de cobre.

Corrosión intergranular La corrosión selectiva en las superficies límites de los granos de un metal o una aleación, sin ataques apreciables a los granos o a los cristales mismos, se denomina corrosión intergranular. Cuando es fuerte, este ataque produce una pérdida de resistencia y ductibilidad fuera de proporción con la cantidad de metal que destruye realmente la corrosión.

Los **aceros inoxidables austeníticos** no estabilizados o que no sean de los tipos de contenido extra-bajo de carbono, cuando se calientan en la gama de temperaturas de 450 a 843°C (850 a 1550°F), tienen precipitaciones, en las superficies límites de los granos de compuestos ricos en cromo (carburos de cromo). Esto provoca el empobrecimiento de cromo en tales superficies y hace que el metal afectado sea propenso a la corrosión intergranular en muchos ambientes. El ácido nítrico caliente es uno de los ambientes que causa severa corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos con precipitación en las superficies límites de los granos. Los aceros inoxidables austeníticos estabilizados con nobio (columbio) o titanio para reducir la formación de carburos o que contengan menos de 0.03% de carbono no suelen ser propensos al deterioro de la superficie límite, al calentarse a las temperaturas de la gama anterior. Los aceros inoxidables austeníticos no estabilizados o los tipos con un contenido normal de carbono, para que sean inmunes a la corrosión intergranular, deben recibir un recocido en solución. Esto consiste en el calentamiento hasta 1090°C (2000°F), y el mantenimiento a esa temperatura durante un mínimo de 1 h/in de espesor, seguido por el enfriamiento rápido en agua (o bien, si esto último no es práctico por el tamaño muy grande, el enfriamiento rápido con una aspersión de aire y agua).

Fractura de corrosión por esfuerzo La corrosión se puede acelerar debido a los esfuerzos, ya sea el esfuerzo residual interno del metal o algún esfuerzo aplicado desde el exterior. Los esfuerzos residuales se producen por la deformación durante la fabricación, por el enfriamiento desigual a partir de temperaturas elevadas y por reordenamientos estructurales internos que implican un cambio de volumen. Los esfuerzos inducidos por remaches y pernos y por ajustes forzados y de contracción se pueden clasificar también como esfuerzos residuales. Para la fractura de corrosión por esfuerzo se requieren esfuerzos de tracción de magnitud igual, por lo común, al esfuerzo de cedencia; sin embargo, se han llegado a producir fallas de este tipo con esfuerzos menores.

Virtualmente todos los sistemas de aleaciones tienen sus condiciones ambientales específicas que producen fractura de corrosión por esfuerzo y el tiempo de exposición necesario para que se produzca una falla variará de unos cuantos minutos a varios años. Entre los ejemplos usuales se incluye el resquebrajamiento del latón formado en frío en ambientes de amoniaco, el agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos en presencia de cloruros; el agrietamiento del metal Monel en ácido fluorsilícico y el agrietamiento por fragilidad cáustica de los aceros de las soluciones cáusticas.

Se puede prevenir esta forma de corrosión en algunos casos mediante la eliminación de los esfuerzos intensos. Los esfuerzos desarrollados durante la fabricación, particularmente durante la soldadura, con frecuencia son las fuentes principales de problemas. Por supuesto, en este tipo de ataque también tienen importancia la temperatura y la concentración.

La presencia de **cloruros** no provoca, generalmente, agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos, cuando las temperaturas se encuentran por debajo de 50°C (120°F). Sin embargo, cuando la temperatura es suficientemente alta para concentrar cloruros en la superficie inoxidable, se puede producir un agrietamiento cuando la concentración de los cloruros en el medio circundante es de unas cuantas partes por millón. Como un ejemplo usual se cita el agrietamiento de tubos de intercambio térmico en las uniones de las juntas laminadas y bajo las incrustaciones en el espacio de vapor del espejo superior en los intercambiadores de calor verticales. El agrietamiento del acero inoxidable con aislamiento se produce cuando la humedad lixivia cloruros del aislamiento y, a continuación, dichos cloruros se concentran en superficies calientes. Los cloruros pueden extraerse del aislamiento por lixiviación o encontrarse en el agua cuando ésta penetra en el aislamiento. Un diseño mejorado y el mantenimiento de un aislamiento impermeable al agua, el recubrimiento del metal antes de instalar el aislamiento y el empleo de un aislamiento libre de cloruros son pasos que ayudarán a reducir (pero no a eliminar) este problema.

Pueden ocurrir fallas graves por fractura de corrosión por esfuerzo cuando se encuentra presente agua que contiene cloruros y no se elimina rápidamente del sistema de acero inoxidable. El empleo de agua potable y el drenado total después de la prueba es la solución más confiable para este problema. Ayudará también la utilización de agua libre de cloruros, sobre todo cuando no es factible el drenado inmediato.

Al manejar product
se desarrollen agrietan
tura es menor de 50°C
la concentración estápr
tamientos en y cerca de
Corrosión por m
pueden causar fractu
les líquidos que pene
de los granos para ca
ataque por mercurio
inoxidable por zinc o
con bastante frecue
galvanizado están so
tales casos, es impe
área que se calentará
Erosión Erosió
abrasión o la fricció
suspendidos o sin el
evitar los ataques de
o bien, cambio en la
Corrosión por c
una corrosión por en
Se presenta cuando
los productos de co
tribuirían a inhibir l
Corrosión por f
(por corrosión) de l
cíclicos o repetido
portante en esta for
yores esfuerzos y, a
los medios corrosiv
minuir la resistenci
a hacer que se acele

FIG
tem
Con

Al manejar productos cáusticos se puede utilizar acero soldado sin que se desarrollen agrietamientos por fragilidad cáustica, cuando la temperatura es menor de 50°C (120°F). Si la temperatura es más alta y sobre todo si la concentración está por encima del 30%, se producen con frecuencia agrietamientos en y cerca de soldaduras sin alivio de esfuerzos.

Corrosión por metales líquidos Los metales líquidos también pueden causar fracturas por corrosión. Los más dañinos son los metales líquidos que penetran en el metal a lo largo de las superficies límites de los granos para causar fallas catastróficas. Los ejemplos incluyen el ataque por mercurio a las aleaciones de aluminio y el ataque del acero inoxidable por zinc o aluminio fundidos. Un problema que se presenta con bastante frecuencia se da cuando las juntas de acero estructural galvanizado están soldadas a tubería o equipo de acero inoxidable. En tales casos, es imperativo retirar completamente el galvanizado del área que se calentará por encima de 260°C (500°F).

Erosión Erosión es la destrucción de un metal por la acción de la abrasión o la fricción causada por el flujo de líquido o gas (con sólidos suspendidos o sin ellos). Algunos de los métodos que se emplean para evitar los ataques de la erosión son el empleo de materiales más duros o bien, cambio en la velocidad o en el ambiente.

Corrosión por choque Este fenómeno se refiere en ocasiones a una corrosión por erosión o a una corrosión acelerada por la velocidad. Se presenta cuando el daño se acelera por la eliminación mecánica de los productos de corrosión (como los óxidos) que, de otro modo, contribuirían a inhibir la reacción de corrosión.

Corrosión por fatiga La corrosión por fatiga es una reducción (por corrosión) de la capacidad de un metal para soportar **esfuerzos cíclicos o repetidos**. La superficie del metal desempeña un papel importante en esta forma de daño, puesto que será la que soporte los mayores esfuerzos y, al mismo tiempo, estará sometida a los ataques de los medios corrosivos. La corrosión de la superficie metálica hará disminuir la resistencia a la fatiga y el esfuerzo sobre la superficie tenderá a hacer que se acelere la corrosión.

En condiciones de esfuerzos cíclicos o repetidos, se produce la rotura de las películas protectoras de óxido que evitan la corrosión con una rapidez mayor que la de la formación de nuevas películas protectoras. Con frecuencia, esa situación tiene como consecuencia la formación de zonas anódicas en los puntos de rotura; esas zonas producen picaduras que sirven como puntos de concentración del esfuerzo para el origen de grietas que provocan fallas finales.

Erosión por cavitación La formación de huecos transitorios o burbujas de vacío en una corriente de líquido que pasa sobre una superficie se denomina cavitación. Esto se encuentra a menudo cerca de las hélices, los timones, los codales y las bombas. Cuando estas burbujas de vacío chocan contra una superficie metálica, hay un fuerte impacto o un efecto explosivo que puede causar daños mecánicos considerables y la corrosión se puede acelerar intensamente, debido a la destrucción de películas protectoras. En general, se requiere el rediseño o un metal más resistente para evitar este problema.

Corrosión por rozamiento Este ataque se produce cuando los metales se deslizan uno sobre otro y se provocan daños mecánicos en uno de ellos o en los dos. En ese caso, el calor de fricción oxida el metal y ese óxido se consume a continuación, o bien, el retiro mecánico de óxidos protectores da como resultado la exposición de las superficies limpias a los ataques corrosivos. La corrosión por rozamiento se minimiza utilizando materiales más duros, minimizando la fricción (mediante la lubricación) o diseñando el equipo de tal modo que no se produzca ningún movimiento relativo de las piezas.

Ataque por hidrógeno A temperaturas elevadas y presiones parciales significativas, el hidrógeno penetrará el acero al carbono, y reaccionará con el carbono para formar metano. La presión generada causa una pérdida en la ductibilidad (fragilidad por hidrógeno) y la fractura por agrietamiento o ampollas en el acero. La eliminación del carbono del acero (descarburización) ocasiona un decremento en su resistencia. La resistencia a este tipo de ataque se mejora por la aleación con molibdeno o cromo. Los límites aceptados para el empleo de

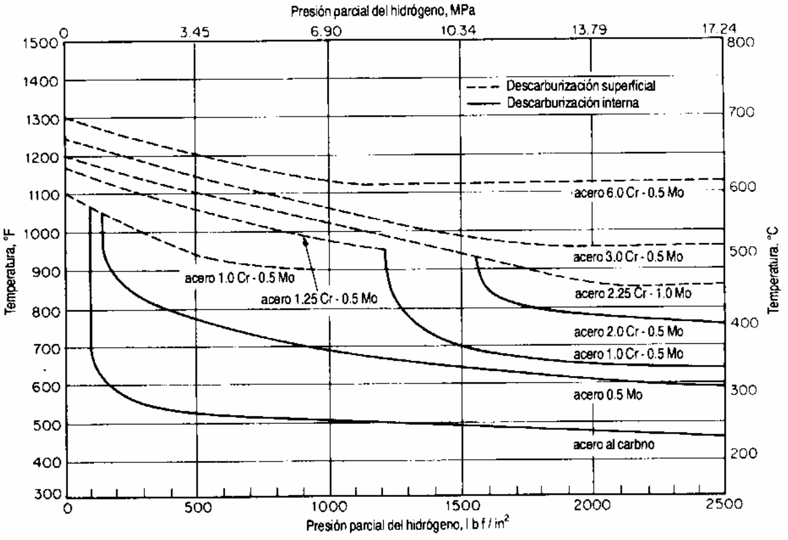


FIG. 23-1 Límites de operación para aceros que son utilizados con hidrógeno. Cada acero se puede emplear en las condiciones de temperatura y presión parcial del hidrógeno por abajo y a la izquierda de su curva respectiva. (*Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*)

acero al carbono y de baja aleación se muestran en la figura 23-1, que se adaptó de la Publicación 941 del American Petroleum Institute (API), *Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants.*

El daño por hidrógeno también puede derivarse del hidrógeno generado en reacciones de corrosión electroquímica. Este fenómeno se observa comúnmente en soluciones de ácidos débiles específicos. Los ácidos H_2S y HCN son los más comunes, aunque existen otros ácidos que pueden causar problemas. El hidrógeno atómico formado en la superficie metálica por la reacción de corrosión se difunde dentro del metal y forma hidrógeno molecular en microrreceptáculos en el metal. El resultado es la fractura por fragilidad, agrietamiento y ampollado.

CORROSIÓN POR FLUIDO: ESTRUCTURAL

Corrosión grafítica La corrosión grafítica se asocia por lo común con el **hierro colado gris**, en el cual el hierro metálico se convierte en productos de corrosión, dejando un residuo de grafito intacto mezclado con productos de corrosión de hierro y otros constituyentes insolubles de hierro colado.

Cuando la capa de grafito y productos de corrosión se hace impermeable a la solución disminuirá o cesará la corrosión. Si la capa es porosa, la corrosión avanzará debido al comportamiento galvánico entre el grafito y el hierro. El índice de este ataque será, aproximadamente, el de la penetración máxima del acero por picaduras. La capa de grafito que se forma puede ser también eficiente para reducir la acción galvánica entre el hierro colado y otras aleaciones más nobles, como el bronce, que se utiliza para la guarnición de válvulas y las hélices en las bombas.

Los **hierros colados de baja aleación** muestran con frecuencia una resistencia superior a la corrosión grafítica, debido, aparentemente, a su estructura más densa y al desarrollo de recubrimientos grafíticos más compactos y protectores. Los **hierros colados austeníticos** de alta aleación muestran una superioridad considerable sobre los hierros colados grises en lo que se refiere a la corrosión grafítica, debido al potencial más noble de la matriz austenítica más los recubrimientos grafíticos más protectores.

Los **aceros al carbono** calentados durante periodos prolongados a temperaturas por encima de 455°C (850°F), se pueden someter a la segregación del carbono, que se transforma en grafito. Cuando ocurre esto, se verá afectada la resistencia estructural del acero. Los aceros muertos o de baja aleación de cromo y molibdeno o cromo y níquel se deben tomar en consideración para servicios a temperaturas elevadas.

Corrosión separativa o ataque de aleaciones Este tipo de corrosión ocurre cuando sólo uno de los componentes de una aleación se elimina por corrosión. El tipo más común es la deszincificación o pérdida del zinc del latón.

Deszincificación Se trata de la corrosión de una aleación de latón que contenga zinc, en donde el producto principal de la corrosión es cobre metálico. Esto puede presentarse como tapones que rellenan las picaduras (tipo tapón) o en capas continuas que rodean a un núcleo no atacado de latón (tipo general). El mecanismo puede incluir corrosión total de la aleación, seguida por la redeposición del cobre a partir de los productos de corrosión o la corrosión selectiva del zinc o una fase rica en zinc, para dejar un residuo de cobre. Esta forma de corrosión se encuentra comúnmente en los latones que contienen más del 15% de zinc y se puede eliminar o reducir mediante la adición de pequeñas cantidades de **arsénico, antimonio** o **fósforo** a la aleación.

Corrosión biológica La actividad metabólica de los microorganismos puede provocar directa o indirectamente un deterioro del metal por procesos de corrosión. Esa actividad puede **1**) producir un ambiente corrosivo, **2**) crear celdas de concentración electrolítica en la superficie del metal, **3**) modificar la resistencia de las películas superficiales, **4**) tener influencia sobre la velocidad de reacción anódica o catódica, y **5**) modificar la composición ambiental.

Los microorganismos que se asocian a la corrosión son de dos tipos: aeróbicos y anaeróbicos. Los microorganismos **aeróbicos** crecen con facilidad en un ambiente que contenga oxígeno, mientras que las especies **anaeróbicas** se desarrollan en un ambiente virtualmente desprovisto de oxígeno atmosférico.

La manera en que estas bacterias llevan a cabo sus procesos químicos es bastante compleja y, en algunos casos, no se entiende por completo. Se ha investigado ampliamente el papel de las **bacterias de reducción de sulfatos** (anaeróbicas) en el fomento de la corrosión. Los sulfatos en suelos ligeramente ácidos a alcalinos (pH 6 a 9) son reducidos por esas bacterias, para formar sulfuro de calcio y sulfuro de hidrógeno. Cuando estos compuestos entran en contacto con las tuberías de hierro subterráneas, se produce una conversión del hierro a sulfuro de hierro. Puesto que esas bacterias se desarrollan en esas condiciones, seguirán fomentando esta reacción, hasta que se produzca una falla de la tubería.

Varios casos de corrosión biológica grave se presentan cuando el agua de prueba no se elimina rápidamente de los sistemas de acero inoxidable. Estos casos se han presentado con agua potable y con agua no potable. La actividad biológica ha causado la perforación del acero inoxidable en pocos meses. El empleo de agua de calidad potable y el drenado inmediato y completo después de una prueba constituye la solución más confiable para este problema.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

pH de la solución La velocidad de corrosión de la mayor parte de los metales se afecta por el pH. La relación existente tiende a seguir uno de los tres patrones generales:

1. Los metales solubles en ácido, como el hierro, presentan una relación como la que se muestra en la figura 23-2*a*. En el nivel de pH medio (≈ 4 a 10), la velocidad de la corrosión está controlada por la velocidad de transporte del oxidante (generalmente oxígeno disuelto) a la superficie metálica. El hierro es ligeramente anfotérico. A temperaturas muy altas, como las que se encuentran en las calderas, la velocidad de corrosión aumenta con el incremento de la basicidad, como muestra la línea punteada.

2. Los metales anfotéricos como el aluminio y el zinc presentan la relación que se muestra en la figura 23-2*b*. Estos metales se disuelven rápidamente en soluciones ácidas o básicas.

3. Los metales nobles como el oro y el platino no son afectados apreciablemente por el pH, como se muestra en la figura 23-2*c*.

Agentes oxidantes En algunos procesos de corrosión, como la solución de zinc en ácido clorhídrico, puede desprenderse hidrógeno como gas. En otros, como la solución relativamente lenta del cobre en cloruro de sodio, la eliminación de hidrógeno, que se tiene que producir para que se lleve a cabo la corrosión, se efectúa mediante una reacción entre el hidrógeno y algún producto químico oxidante, como el oxígeno, para formar agua. Debido a las elevadas velocidades de corrosión que suelen acompañar al desprendimiento de hidrógeno, es raro que se empleen metales en soluciones donde existe hidrógeno en cantidad apreciable. Como resultado, la mayor parte de la corrosión observada en la práctica se produce en condiciones en que la oxidación del hidrógeno para formar agua es una parte necesaria del proceso de corrosión. Por esta razón, los agentes oxidantes son con frecuencia aceleradores poderosos de la corrosión y, en muchos casos, el **poder oxidante de una solución** es su propiedad simple más importante, en lo que se refiere a la corrosión.

Los agentes oxidantes que aceleran la corrosión de algunos materiales pueden retrasar también la corrosión de otros, mediante la formación, en su superficie, de óxidos o la adsorción de capas de oxígeno, que las hacen más resistentes a los ataques químicos. Esta propiedad del cromo es la base de las principales características de resistencia a la corrosión que tienen los aceros inoxidables.

De esto se desprende que las sustancias oxidantes, como el aire disuelto, pueden acelerar la corrosión de una clase de materiales y retra-

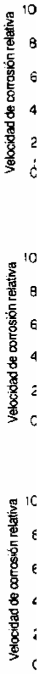


FIG. 23-2 Efecto ... anfotéricos (alumini...

sar la de otros. En ... por lo común, una ... para preservar una ... corrosión, cuando ... protección pueden ...

Temperatura ... me se eleva la temp... mediante su influe... tancia oxidante m... provoca también ... cambios de fase ... ejemplos se pued... con sustancias org...

Velocidad U... entre una solució... la corrosión. Este ... tos químicos con ... llegan a la superf... productos de la c... sión misma, se re... gadas serán las p... tancias corrosiva... de corrosión, que ...

Siempre que se ... mulación de capa... cie metálica, el e...

ión son de dos tipos:
eróbicos crecen con
iientras que las espe-
'irtualmente despro-

sus procesos quími-
e entiende por com-
las bacterias de re-
de la corrosión. Los
(pH 6 a 9) son redu-
calcio y sulfuro de
ontacto con las tube-
'sión del hierro a sul-
rollan en esas condi-
que se produzca una

presentan cuando el
s sistemas de acero
ua potable y con agua
erforación del acero
calidad potable y el
prueba constituye la

'ORROSIÓN

de la mayor parte de
tente tiende a seguir

ierro, presentan una
la. En el nivel de pH
stá controlada por la
nte oxígeno disuelto)
anfotérico. A tempe-
las calderas, la velo-
e la basicidad, como

y el zinc presentan la
metales se disuelven

ino no son afectados
a figura 23-2c.
corrosión, como la
prenderse hidrógeno
nte lenta del cobre en
e se tiene que produ-
a mediante una reac-
o oxidante, como el
s velocidades de co-
de hidrógeno, es ra-
existe hidrógeno en
parte de la corrosión
s en que la oxidación
saria del proceso de
son con frecuencia
chos casos, el poder
e más importante, en

de algunos materia-
, mediante la forma-
le capas de oxígeno,
icos. Esta propiedad
ticas de resistencia a

ntes, como el aire di-
de materiales y retra-

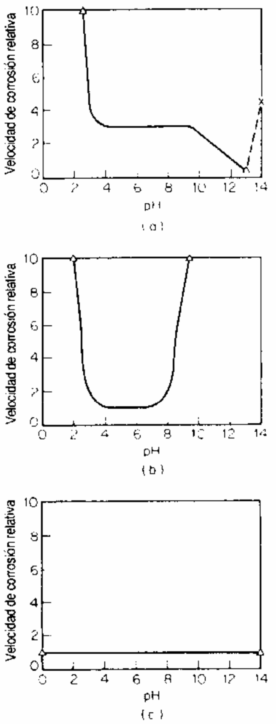


FIG. 23-2 Efecto del pH en la velocidad de corrosión. (a) Hierro. (b) Metales anfotéricos (aluminio, zinc). (c) Metales nobles.

sar la de otros. En el último caso, la conducta del material representa, por lo común, un equilibrio entre el poder de los compuestos oxidantes para preservar una película de protección y su tendencia a acelerar la corrosión, cuando los agentes causantes de la rotura de la película de protección pueden destruir las películas.

Temperatura La velocidad de corrosión tiende a aumentar conforme se eleva la temperatura. Esta última tiene también efectos secundarios mediante su influencia sobre la solución del aire (oxígeno), que es la sustancia oxidante más común que influye en la corrosión. La temperatura provoca también efectos específicos cuando un cambio en ésta causa cambios de fase que introducen una segunda fase corrosiva. Como ejemplos se pueden citar los sistemas de condensación y los sistemas con sustancias orgánicas saturadas con agua.

Velocidad Un aumento de la velocidad del movimiento relativo entre una solución corrosiva y una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión. Este efecto se debe a la mayor rapidez con que los productos químicos corrosivos, incluyendo las sustancias oxidantes (aire), llegan a la superficie que se corroe y a la mayor rapidez con que los productos de la corrosión, que podrían acumularse y reducir la corrosión misma, se retiran. Cuanto mayor sea la velocidad, tanto más delgadas serán las películas a través de las cuales deben penetrar las sustancias corrosivas y por las cuales se tienen que difundir los productos de corrosión, que son solubles.

Siempre que se produce resistencia a la corrosión, debido a la acumulación de capas de productos de corrosión insolubles en la superficie metálica, el efecto de la alta velocidad puede evitar su formación normal o retirarlos después que se forman. Cualquiera de esos efectos permite que la corrosión siga adelante sin obstáculos. Esto sucede con frecuencia en los tubos o las tuberías de diámetro pequeño, por los cuales pueden circular líquidos corrosivos con altas velocidades (p. ej., los tubos de condensadores y evaporadores), en las cercanías de codos en las líneas de tuberías y en hélices, agitadores y bombas centrífugas. Se asocian efectos similares a la erosión por cavitación, y a la corrosión por choque.

Películas Una vez que se inicia la corrosión, su avance se ve controlado con mucha frecuencia por la naturaleza de las películas, como las pasivas, que se pueden formar o acumular en la superficie metálica. El ejemplo clásico es la **película de óxido** delgada que se forma en los aceros inoxidables.

Los productos insolubles de la corrosión pueden ser impermeables al líquido corrosivo y, por lo tanto, ser completamente protectores, o bien, pueden ser bastante permeables y permitir la corrosión local o general sin obstáculos. Las películas no continuas o no uniformes tienden a localizar la corrosión en zonas determinadas mediante la iniciación de efectos electrolíticos del tipo de celda de concentración. Las películas pueden tender a retener o absorber humedad y, en esa forma, a retrasar el tiempo de desecación e incrementar el grado de la corrosión resultante de la exposición a la atmósfera o los vapores corrosivos.

En general, se acepta que las características de las **películas de herrumbre** que se forman en los aceros determinan su resistencia a la corrosión atmosférica. Las películas de herrumbre que se forman en los aceros de aleaciones bajas son más protectoras que aquéllas que son formadas sobre los aceros sin aleación.

Además de las películas que, al menos en parte, se originan en el metal que se corroe, hay otras que se deben a la solución corrosiva. Entre ellas se incluyen varias sales, como carbonatos y sulfatos que se pueden precipitar de soluciones calentadas y compuestos insolubles, como la "piedra de cerveza", que se forma en las superficies metálicas en contacto con algunos productos específicos. Además, hay películas de aceites y grasas que pueden proteger un material contra el contacto directo con sustancias corrosivas. Esas películas de aceite se pueden aplicar intencionalmente o presentarse en forma natural, como en el caso de los metales sumergidos en aguas negras o los equipos utilizados para el procesamiento de sustancias aceitosas.

Otros efectos La **concentración** de la corriente puede tener efectos importantes sobre las velocidades de corrosión. Desgraciadamente, es raro que estas velocidades sean lineales con la concentración en gamas amplias. En equipos como columnas de destilación, reactores y evaporadores, la concentración puede cambiar continuamente, haciendo que sea difícil la predicción de los índices de corrosión. La concentración es importante durante el paro de una planta; la presencia de humedad que se recoge durante el enfriamiento puede convertir productos químicos inocuos en corrosivos peligrosos.

En lo que se refiere al efecto del tiempo, no hay ninguna ley universal que rija la reacción para todos los metales. Algunas velocidades de corrosión permanecen constantes con el tiempo en gamas amplias, otras disminuyen con el tiempo y algunas aleaciones tienen mayores índices de corrosión con respecto al tiempo. Se pueden desarrollar situaciones en que la velocidad de corrosión puede seguir una combinación de estas trayectorias. Por consiguiente, la extrapolación de los datos de corrosión y las velocidades de corrosión se debe hacer con sumo cuidado.

Las **impurezas** en un material corrosivo pueden ser buenas o malas, desde el punto de vista de la corrosión. Una impureza en una corriente puede actuar como inhibidor y retrasar en realidad la corrosión; sin embargo, si se retira esta impureza por algún cambio de proceso o un mejoramiento, el resultado puede ser una elevación marcada de los grados de corrosión. Por supuesto, otras impurezas pueden tener efectos perjudiciales sobre los materiales. El ion cloruro es un buen ejemplo: las cantidades pequeñas de cloruros en una corriente de procesamiento pueden romper la película de óxido pasivo en los aceros inoxidables. Los efectos de las impurezas son variados y complejos. Es preciso estar conscientes de lo que son, qué cantidades están presentes y de dónde proceden, antes de tratar de recomendar un material particular de construcción.

ATAQUE A ALTA TEMPERATURA

Propiedades físicas Lo adecuado de una aleación para servicios a altas temperaturas, 425 a 1100°C (800 a 2000°F), depende de las propiedades inherentes en la composición de la aleación y en las condiciones de aplicación. La estructura cristalina, la densidad, la conductividad térmica, la resistividad eléctrica, la expansividad térmica, la estabilidad estructural, la gama de temperaturas de fusión y la presión de vapor son propiedades físicas básicas para las composiciones de aleaciones individuales e inherentes a ellas.

En este grupo de propiedades, la **expansividad** suele tener una importancia relativamente elevada. Un número sorprendentemente grande de fallas de metales a temperaturas elevadas es el resultado de esfuerzos térmicos excesivos que se deben a la constricción del metal durante el calentamiento o el enfriamiento. Esa constricción, en el caso de la contracción obstaculizada puede provocar una ruptura.

Otra propiedad física importante es la **estabilidad estructural** de la aleación. Esto significa libertad desde la formación de nuevas fases, o un reacomodo drástico de aquéllas que se encuentran originalmente presentes dentro de la estructura metálica, como resultado de la influencia térmica. Estos cambios pueden tener un efecto nocivo sobre la resistencia a los esfuerzos o a la corrosión, o sobre ambas.

Propiedades mecánicas Las propiedades mecánicas de interés amplio incluyen el corrimiento, la ruptura y las resistencias de corta duración, varias formas de ductibilidad, así como también la resistencia a los impactos y a los esfuerzos por fatiga. La resistencia al corrimiento y la ruptura por esfuerzo suelen tener el mayor interés para los diseñadores de equipos estacionarios, como recipientes y hornos.

Resistencia a la corrosión Quizá tenga mayor importancia que las propiedades mecánicas y físicas la capacidad de una composición química de una aleación para resistir la acción corrosiva de diversos ambientes calientes. Las formas de corrosión a altas temperaturas en que se ha hecho más hincapié son la **oxidación** y la **escamación**.

El cromo es un constituyente esencial en las aleaciones que se van a utilizar por encima de 550°C (1000°F). Se difunde con rapidez y se acumula en la superficie del acero proporcionando una película de óxido sumamente adhesiva, que retrasa materialmente el proceso de la oxidación. El silicio es un elemento útil para darle al acero resistencia a la oxidación, pues realza los efectos convenientes del cromo. Asimismo, para un nivel dado de cromo, la experiencia ha demostrado que la resistencia a la oxidación mejora al incrementarse el contenido de níquel.

El aluminio no se puede utilizar como elemento de aleación en el acero para mejorar la resistencia a la oxidación, puesto que la cantidad que se requiere interfiere tanto con las propiedades de resistencia a altas temperaturas como con las posibilidades de trabajo. Sin embargo, el desarrollo de capas superficiales incluyendo el rociamiento, la inmersión y el cementado, es un medio factible de mejoramiento de la resistencia térmica de los aceros de bajas aleaciones.

Los contaminantes como el vanadio y los compuestos de azufre y especialmente los iones de metales alcalinos, presentes en los combustibles tienden a reaccionar en la zona de combustión para formar fundentes en estado de fusión, los que a su vez disolverán la película de óxido protectora depositada sobre el acero inoxidable, permitiendo de este modo que la oxidación tenga lugar a una velocidad rápida. Este problema se ha vuelto más común con el alto costo y el suministro reducido del gas natural y de los aceites combustibles destilados, que han obligado al empleo de aceites combustibles residuales y al uso de carbón.

CÓMO COMBATIR LA CORROSIÓN

Selección de materiales El objetivo básico es seleccionar el material que sea más económico y que llene los requerimientos del proceso. La mejor fuente de datos es una experiencia bien fundamentada en una unidad de proceso idéntica. En ausencia de tales datos, se pueden buscar otras fuentes, como la experimentación con unidades piloto o de escala reducida donde se llevarán a cabo ensayos de corrosión, pruebas de laboratorio con fluidos del proceso real, o ensayos de corrosión en soluciones sintéticas del proceso estudiado. Los datos de estas fuentes alternas (que se han enumerado en orden de confiabilidad decreciente) deberán ser evaluados apropiadamente, considerando hasta qué punto una prueba determinada puede fallar en la reproducción de las condiciones reales en una unidad en operación. Se debe poner atención especial en las posibles diferencias entre las pruebas estáticas de laboratorio y el dinamismo de una planta, así como en las trazas de las impurezas (p. ej., los cloruros en los sistemas de acero inoxidable), todo lo cual puede cambiar drásticamente la corrosividad del sistema. También se debe considerar la posibilidad de ataque grave localizado, como las picaduras, la corrosión por grietas o la fractura de corrosión por esfuerzo.

Las **velocidades de corrosión tolerables** son un factor importante y difieren con los equipos. Se puede permitir una corrosión apreciable para los tanques y las líneas, si se prevé y se deja margen para ella, en el espesor de diseño pero no se puede permitir esencialmente ninguna corrosión en las mallas de alambre finas, los orificios y otros puntos en que los cambios pequeños de dimensión sean críticos.

En muchos casos, la utilización de **materiales no metálicos** resultará conveniente desde el punto de vista económico y de desempeño. Se deben tomar en cuenta cuando sus limitaciones de diseño, temperatura y resistencia sean satisfactorias.

Diseño adecuado Las consideraciones de diseño respecto a la minimización de las dificultades de corrosión deben incluir la conveniencia de un drenaje libre y completo, la eliminación de grietas y la facilidad de limpieza e inspección. La instalación de deflectores, atirantadores y boquillas de drenaje y la ubicación de las válvulas y las bombas se deben hacer de modo que se produzca un drenaje libre y que se pueda realizar el lavado sin retención. Siempre que sea práctico, se deberán proporcionar medios de acceso para la inspección y el mantenimiento. Cuando sea posible, convendrá utilizar juntas a tope. Si se utilizan yuxtapuestas utilizando soldaduras fileteadas, estas últimas deberán ser continuas.

En general, se debe evitar la utilización de metales diferentes en contacto entre sí, sobre todo si están muy separados en sus posiciones nominales en la serie electromotriz (véase la Tabla 23-1). Si se van a utilizar juntos, será preciso tomar en consideración su aislamiento mutuo, o bien hacer que el área del material anódico sea tan grande como sea posible.

Los equipos se deben sostener de tal modo que no reposen en pozas de líquido o en algún material aislante húmedo. El aislamiento poroso debe ser a prueba del clima o estar protegido de otro modo contra la humedad y las salpicaduras, con el fin de evitar el contacto del material húmedo con el equipo. Las especificaciones tienen que estar suficientemente completas para asegurarse de que se utilice el tipo de material o la composición que se desee y que se proporcione la condición correcta de acabado superficial y tratamiento térmico. Es conveniente la inspección durante la fabricación y antes de la aceptación.

Modificación del ambiente Los cambios simples en el ambiente pueden introducir una diferencia apreciable en la corrosión de metales y es preciso tomarlos en cuenta como medios para combatir la corrosión. El **oxígeno** es un factor importante y su retiro o su adición puede provocar cambios importantes en la corrosión. Por ejemplo, el tratamiento de agua de alimentación de calderas para retirar oxígeno, reduce considerablemente la corrosividad del agua sobre el acero. La purga de gases inertes y la interferencia de muchas soluciones, sobre todo los medios ácidos, reducen en general la corrosión de las aleaciones con base de cobre y níquel, al minimizar el contenido de aire u oxígeno. Por otra parte, la corrosividad de los medios ácidos para las aleaciones inoxidables se puede reducir mediante la aireación, debido a la formación de películas de óxido pasivo. La reducción de la temperatura será casi siempre provechosa en lo que se refiere a la reducción de la corrosión si no resultan cambios en la fase corrosiva (p. ej., condensación). Los efectos debidos a la velocidad variarán con el material y el sistema corrosivo. Cuando los valores de pH se pueden modificar, será conve-

con unidades piloto
ayos de corrosión,
l, o ensayos de co-
iado. Los datos de
en de confiabilidad
ente, considerando
llar en la reproduc-
operación. Se debe
s entre las pruebas
ata, así como en las
sistemas de acero
ente la corrosividad
dad de ataque grave
etas o la fractura de

factor importante y
orrosión apreciable
margen para ella, en
icialmente ninguna
os y otros puntos en
cos.
no metálicos resul-
o y de desempeño.
de diseño, tempera-

ño respecto a la mi-
cluir la convenien-
de grietas y la faci-
ón de deflectores,
de las válvulas y las
drenaje libre y que
que sea práctico, se
pección y el mante-
juntas a tope. Si se
adas, estas últimas

tales diferentes en
s en sus posiciones
a 23-1). Si se van a
su aislamiento mu-
ea tan grande como

o reposen en pozas
aislamiento poroso
otro modo contra la
contacto del material
que estar suficien-
el tipo de material
ne la condición co-
. Es conveniente la
ptación.
ples en el ambiente
orrosión de metales
combatir la corro-
o su adición puede
r ejemplo, el trata-
tirar oxígeno, redu-
e el acero. La purga
ones, sobre todo los
las aleaciones con
aire u oxígeno. Por
a las aleaciones in-
debido a la forma-
la temperatura será
ducción de la corro-
ej., condensación).
aterial y el sistema
dificar, será conve-

niente, en general, mantener el nivel de ácido en un mínimo. Cuando se adicionan ácidos en los procesos por lotes, puede ser conveniente agregarlos en último lugar, con el fin de obtener la dilución máxima y la concentración mínima de ácido, así como también el menor tiempo posible de exposición. Los valores alcalinos de pH son menos importantes que los valores ácidos en lo que se refiere al control de la corrosión. La eliminación de la humedad puede y frecuentemente minimiza, si no evita, la corrosión de los metales y esta posibilidad de la modificación ambiental se debe tomar en cuenta con el mayor cuidado.

Inhibidores El empleo de diversas sustancias o inhibidores como aditivos a los ambientes corrosivos, para reducir la corrosión de los metales en el ambiente, es un medio importante de combate de la corrosión. En general, resulta más atractivo en sistemas cerrados o de recirculación en los que el costo anual del inhibidor es bajo. Sin embargo, también ha resultado económicamente conveniente para muchos sistemas de una sola pasada, como los que se encuentran en las operaciones de procesamiento del petróleo. Los inhibidores son eficaces debido a su influencia de control sobre las reacciones de las zonas catódicas o anódicas.

Como ejemplos típicos de los inhibidores utilizados para minimizar la corrosión del hierro y el acero en soluciones acuosas se tienen los cromatos, los fosfatos y los silicatos. Los materiales de sulfuros orgánicos y aminas resultan con frecuencia eficaces para reducir la corrosión del hierro y el acero en solución ácida.

El empleo de inhibidores no se limita al control de la corrosión del hierro y el acero, sino que, con frecuencia, son eficientes con el acero inoxidable y otros materiales de aleación. La adición de sulfato de cobre al ácido sulfúrico diluido detiene a veces la corrosión de los aceros inoxidables en soluciones diluidas calientes, mientras que el ácido no inhibido provoca una corrosión rápida.

La eficiencia de un inhibidor determinado aumenta generalmente con el incremento de la **concentración**; pero los inhibidores que se consideran atractivos desde el punto de vista práctico y económico se utilizan en cantidades de menos de 0.1% en peso.

En algunos casos, la cantidad de inhibidor que se encuentra presente es fundamental, ya que una deficiencia puede dar como resultado un ataque localizado o de picaduras, con la consecuencia de que los resultados son todavía más destructivos que si no se encontrara presente el inhibidor. Por tanto, la consideración del uso de inhibidores debe incluir la revisión de la experiencia en sistemas similares o la investigación de necesidades y limitaciones en nuevos sistemas.

Protección catódica Este método electroquímico de control de la corrosión se aplica mucho en la protección de estructuras subterráneas de acero al carbono, como tuberías y tanques que se encuentran expuestos a la corrosión externa del suelo. También se emplea con mucha frecuencia en sistemas acuosos para proteger cascos de barco, estructuras costeras y tanques de almacenamiento de agua.

En la actualidad se utilizan dos métodos para proporcionar protección catódica para minimizar la corrosión de los metales. Se trata del método de ánodo de sacrificio y el de fem impresa. Los dos dependen de que se convierta el metal que se va a proteger en el cátodo del electrólito en cuestión.

Entre los ejemplos del método de **ánodo de sacrificio** se incluye el empleo de zinc, magnesio o aluminio como ánodos en contacto eléctrico con el metal que se va a proteger. Pueden ser ánodos enterrados para la protección de líneas de tuberías subterráneas o como adherencias a superficies de equipos como cajas de agua de condensadores o los cascos de los barcos. La corriente que se requiere se genera en este método por corrosión del material del ánodo de sacrificio. En el caso de la **fem impresa**, la corriente directa se proporciona por medio de fuentes externas y se hace pasar por el sistema mediante el empleo de ánodos que esencialmente no son de sacrificio, como carbono, aleaciones no corroíbles o platino enterrado en la tierra o suspendido en el electrólito, en el caso de los sistemas acuosos.

Las necesidades en relación con la distribución de la corriente y la colocación del ánodo varían con la resistividad de los suelos o el electrólito de que se trate.

Protección anódica Este método electroquímico se apoya en un sistema de control de potencial externo (potenciostato) para mantener el metal o la aleación en una condición no corroíble (pasiva). Las aplicaciones prácticas incluyen enfriadores de ácido en las plantas de ácido sulfúrico y en los tanques de almacenamiento para el citado ácido.

Recubrimientos y forros El empleo de materiales no metálicos para forros y recubrimientos en combinación con el acero u otros materiales ha sido, y seguirá siendo, un tipo importante de construcción para combatir la corrosión.

Se utilizan **recubrimientos orgánicos** de muchos tipos como forros en equipos como tanques, tuberías, líneas de bombeo y recipientes especiales de embarque ("contenedores") y constituyen a menudo un medio económico de control de la corrosión, sobre todo cuando el principal objetivo es la libertad de contaminación del metal. Un principio que se acepta en general es que no se deben utilizar recubrimientos delgados, del tipo de pintura, de menos de 0.75 mm (0.03 in) de espesor, en servicios en los que se requiere una protección completa, para evitar el ataque rápido al sustrato metálico. Esto se debe a que la mayor parte de los recubrimientos delgados contienen defectos que conducen a fallas tempranas debido a la corrosión del sustrato metálico, aun cuando el material de recubrimiento sea resistente. Siempre es conveniente la prueba eléctrica para la continuidad de los forros del tipo de recubrimiento para aplicaciones en servicios sumergidos, con el fin de detectar defectos del tipo de lagunas en el recubrimiento.

Los forros más seguros para servicios corrosivos son los que se adhieren directamente al sustrato y se ensamblan en efectos de capas múltiples o laminados hasta espesores de más de 2.5 mm (0.10 in). Incluyen sistemas de vidrio-fibra-resinas reforzadas y sistemas plásticos elastoméricos y plastificados. Una buena preparación superficial y la inspección profunda del recubrimiento completo, incluyendo las pruebas eléctricas, se deben considerar como requisitos mínimos para cualquier aplicación de recubrimiento.

Los forros de este tipo son ligeramente permeables a muchos líquidos; esta permeabilidad es probable que no dañe al forro, pero puede causar fallas promoviendo la desunión del forro debido a presiones entre el forro y el acero.

Con frecuencia se utilizan **recubrimientos de ladrillos de carbono o cerámicos** como recubrimiento exterior sobre forros de plástico o membranas, cuando las temperaturas superficiales sobrepasen aquéllas que puedan ser toleradas por los materiales sin protección, o cuando la membrana deba protegerse contra daños mecánicos. Este tipo de construcción permite el procesamiento de materiales que son demasiado corrosivos para manejarlos en construcciones metálicas de bajo costo.

Acero recubierto de vidrio Aplicando los métodos apropiados, algunas clases especiales de vidrios pueden ser unidas al acero, lo que da por resultado una barrera impermeable con un espesor de 1.5 a 2.5 mm (0.060 a 0.100 in). El equipo y la tubería preparados de esta manera se emplean habitualmente en el servicio de ácidos extremadamente corrosivos. El recubrimiento de vidrio se puede dañar mecánicamente, y si se quieren alcanzar buenos resultados con este sistema se debe prestar una atención muy cuidadosa a los detalles de diseño, inspección, instalación y mantenimiento.

El **revestimiento** del acero con una aleación es otro método para abordar este problema. En la actualidad hay ciertos métodos de revestimiento que se utilizan comúnmente. En uno de ellos, se hace un emparedado con el metal resistente a la corrosión y acero al carbono mediante laminado en caliente para producir una **soldadura a presión** entre las placas.

Otro proceso implica la **unión por explosión**. El metal resistente a la corrosión se adhiere a un metal de respaldo de acero mediante la fuerza generada por cargas explosivas situadas de modo apropiado. Se pueden ligar secciones relativamente gruesas de metal por esta técnica, en placas.

En un tercer proceso, se sujeta un **recubrimiento suelto** a una coraza de acero al carbono mediante soldaduras espaciadas en tal forma que se evite la caída del recubrimiento. Un cuarto proceso es la **solda-**

dura de superpuestas, que implica depositar placas múltiples de aleación metálica soldable para cubrir la superficie de acero.

Todos estos métodos requieren un cuidadoso diseño de fabricación para poder tener éxito.

Recubrimientos metálicos para ambientes moderados Los **recubrimientos de zinc** aplicados por diversos medios tienen buena resistencia a la corrosión en muchas atmósferas. Esos recubrimientos se han utilizado ampliamente en acero. El zinc tiene la ventaja de ser anódico al acero y, por ende, protegerá las zonas expuestas del acero mediante una acción electroquímica.

El acero recubierto con estaño (**estañado**) se utiliza en recipientes para alimentos. Es más noble que el acero; por consiguiente, las soluciones bien aireadas acelerarán galvánicamente el ataque del acero en las zonas expuestas. La falta relativa de aire dentro de los recipientes para alimentos contribuye a preservar tanto el estaño como los alimentos mismos. Asimismo, el potencial reversible que sufre el par de estaño y hierro en ácidos orgánicos sirve para proteger el acero expuesto en los recipientes para alimentos.

Cadmio Puesto que es anódico hacia el acero, se comporta de modo muy similar al zinc para proporcionar protección contra la corrosión cuando se aplica como recubrimiento sobre el acero. Se deben realizar pruebas en los revestimientos zinc y cadmio cuando se hace necesario determinar la selección más económica para un ambiente particular.

El **plomo** tiene buena resistencia a varias atmósferas. Como recubrimiento ha tenido su mayor aplicación en la producción de lámina de estaño emplomado que se emplea como material para tejados, cornisas y desagües.

Los **recubrimientos de aluminio** sobre acero tienen un desempeño similar al de los recubrimientos de zinc. El aluminio tiene buena resistencia a muchas atmósferas; además, puesto que es anódico al acero, protege galvánicamente las zonas expuestas. Los productos de acero recubierto con aluminio son muy útiles en condiciones a altas temperaturas, cuando se requiere una buena resistencia a la oxidación.

MÉTODOS PARA PROBAR LA CORROSIÓN

No hay modo estándar ni preferido para efectuar una prueba de la corrosión; el método se debe escoger para que se ajuste a la finalidad de la prueba. Los **tipos de pruebas** principales son, en orden decreciente de confiabilidad:

1. La experiencia operacional real con equipos de plantas a escala completa, expuestos al medio corrosivo.
2. Experiencia con equipos de plantas en pequeña escala, ya sea en condiciones comerciales o de planta piloto.
3. Pruebas de muestras sobre el terreno que incluyen muestras de acero, muestras esforzadas, sondas de resistencia eléctrica expuestas al medio de corrosión de la planta o muestras expuestas a la atmósfera, a tierras o a aguas dulces, salobres o saladas.
4. Pruebas de laboratorio con muestras expuestas a líquidos de plantas "reales" o ambientes simulados.

Las pruebas de corrosión en la planta o sobre el terreno son útiles para:

1. Selección del material más apropiado para resistir un ambiente dado y estimar su durabilidad probable en ese ambiente.
2. Estudio de la eficacia de los medios para evitar la corrosión.

PRUEBAS DE CORROSIÓN EN LABORATORIO

Los metales y las aleaciones no responden del mismo modo a todas las influencias de los numerosos factores que participan en la corrosión. En consecuencia, no es práctico establecer procedimientos estándares universales de laboratorio para las pruebas de corrosión, con excepción de las pruebas de inspección. Sin embargo, algunos detalles de las pruebas en laboratorio requieren una atención cuidadosa para poder obtener resultados útiles.

En la selección de materiales para construir una planta química, el factor determinante suele ser, con frecuencia, la resistencia al medio corrosivo; de otro modo, la elección caerá en forma automática sobre el material más barato que sea mecánicamente adecuado. A menudo, las pruebas de corrosión en laboratorio son los medios más rápidos y satisfactorios para efectuar una **selección preliminar** de los materiales más adecuados que se deben utilizar. No obstante, de modo lamentable, no se encuentra todavía dentro del estado actual de las pruebas de laboratorio la predicción exacta del comportamiento del material escogido en las condiciones operacionales de la planta. La dificultad principal recae no tanto en efectuar la prueba como en interpretar los resultados y en traducirlos en términos de operación de la planta. Una prueba de laboratorio de tipo común da primordialmente un factor: la resistencia química del material propuesto al agente corrosivo. Hay otros muchos factores que entran en el comportamiento del material en la planta, como gases disueltos, velocidad, turbulencia, abrasión, condiciones de agrietamientos, efectos de paredes calientes, efectos de paredes frías, niveles de esfuerzo de los metales, trazas de impurezas en el corrosivo, que actúan como aceleradores o inhibidores de la corrosión, y variaciones en la composición del material corrosivo.

Un buen método para determinar el factor de resistencia química, la llamada **prueba de inmersión total,** representa un método no acelerado, que, como se ha descubierto, da resultados razonablemente concordantes, de conformidad aproximada con los resultados obtenidos a gran escala, cuando se toman en consideración las otras variables. Se han propuesto otras pruebas y se utilizan en la actualidad, como la aspersión de sal, la prueba electrolítica acelerada, la inmersión alterna y la inmersión total aireada; sin embargo, en vista de las muchas complicaciones para la traducción de los resultados de laboratorio a los resultados de la planta, se considera que la prueba más sencilla es la más conveniente para trabajos preliminares de rutina, reservando los métodos especiales de prueba para los casos específicos. La prueba de inmersión total sirve muy bien para eliminar los materiales que, evidentemente, no se pueden utilizar; se puede llevar a cabo una selección adicional entre los materiales que aparentemente se pueden usar, sobre la base del conocimiento de las propiedades de los materiales de que se trate y las condiciones de trabajo mediante la construcción de equipos a gran escala del material propuesto, en el cual se pueden simular las condiciones operacionales.

La National Association of Corrosion Engineers (NACE) estableció el Standard TM-01-69, Laboratory Corrosion Testing of Metals for the Process Industries [*Mater. Prot.*, 13-24 (mayo, 1969)], que cubre la prueba de inmersión total. La descripción que sigue se basa en esta norma.

Piezas para pruebas El tamaño y la forma de los especímenes variarán de acuerdo con la finalidad de la prueba, la naturaleza del material y el aparato que se utilice. Son convenientes una razón grande de superficie a masa y una razón pequeña de área de borde a área total. Esas razones se pueden alcanzar mediante la utilización de especímenes rectangulares o circulares de espesor mínimo. Los especímenes circulares se deben cortar de preferencia de láminas y no de barras, con el fin de minimizar los granos de los extremos que estén expuestos.

Un espécimen circular de aproximadamente 38 mm (1.5 in) de diámetro será una forma conveniente para las pruebas de corrosión de laboratorio. Con un espesor de, aproximadamente, 3 mm ($^1/_8$ in) y un orificio con diámetro de 8 u 11 mm ($^5/_{16}$ o $^7/_{16}$ de in) para el montaje, esos especímenes pasarán con facilidad por una junta de cristal esmerilado de 45/50 de una caldera de destilación. El área de superficie total de un espécimen circular se obtiene mediante la ecuación

$$A = \frac{\pi}{2}(D^2 - d^2) + t\pi D + t\pi d$$

en donde t = espesor, D = diámetro del espécimen y d = diámetro del orificio de montaje. Si el orificio está completamente cubierto por un soporte de montaje, se omite el término final ($t\pi d$) de la ecuación.

Las muestras de
1 por $^1/_{16}$ o $^1/_8$ in)]
sobre todo si se deb
tos de entrecara o l

Todos los especí
el cálculo exacto d
cálculo de área co

Se pueden espe
importante de met
riaciones en las co
puede lograr por t
merilado con una t
teniendo cuidado
retirar, por lo meno
a 15 mg/in²). Si se
se debe prestar una
mine metal en exc
del espécimen, los
hasta la exposició

Los especímene
polvo limpiador, s
en agua y un disol
una mezcla de 50
Para los metales r
sio y el cobre, no s
vo, que podría ray
para la desecación
de los especímene
berá pesar en una

Aparatos Se
que consiste en u
siempre de 500 a
férico, un aspersor
sitivo regulador
placa caliente o n
requiere agitación
canismo de agitac
En la figura 23-3

Vaina del termóm

Frasco de re

Muest
suspendida
sop

Ent
de

FIG. 23-3 Dispo
rrosión (Basada en

idadosa para poder

a planta química, el
esistencia al medio
a automática sobre
ecuado. A menudo,
edios más rápidos y
inar de los materia-
ite, de modo lamen-
ctual de las pruebas
miento del material
lanta. La dificultad
omo en interpretar
ración de la planta.
rimordialmente un
sto al agente corro-
omportamiento del
cidad, turbulencia,
de paredes calien-
de los metales, tra-
omo aceleradores o
nposición del mate-

istencia química, la
n método no acele-
zonablemente con-
ultados obtenidos a
s otras variables. Se
ualidad, como la as-
inmersión alterna y
las muchas compli-
oratorio a los resul-
s sencilla es la más
reservando los mé-
ficos. La prueba de
materiales que, evi-
cabo una selección
e pueden usar, sobre
s materiales de que
nstrucción de equi-
l se pueden simular

(NACE) estableció
ing of Metals for the
969)], que cubre la
gue se basa en esta

de los especímenes
a, la naturaleza del
es una razón grande
e borde a área total.
ación de especíme-
. Los especímenes
s y no de barras, con
estén expuestos.
mm (1.5 in) de diá-
as de corrosión de
, 3 mm ($^1/_8$ in) y un
n) para el montaje.
nta de cristal esme-
a de superficie total
uación

d

y *d* = diámetro del
nte cubierto por un
) de la ecuación.

Las muestras de acero en bandas [50 por 25 por 1.6 o 3.2 mm (2 por 1 por $^1/_{16}$ o $^1/_8$ in)] se pueden preferir como especímenes de corrosión, sobre todo si se deben estudiar, mediante pruebas en laboratorio, efectos de entrecara o línea de líquido.

Todos los especímenes se deberán medir con cuidado para permitir el cálculo exacto de las zonas expuestas. Por lo común, es adecuado un cálculo de área con una precisión de hasta, más o menos, 1%.

Se pueden esperar resultados más uniformes, si se retira una capa importante de metal de los especímenes, con el fin de eliminar las variaciones en las condiciones de la superficie metálica original. Esto se puede lograr por tratamiento químico, eliminación electrolítica o esmerilado con una tela o un papel de lija fuerte, digamos del número 50, teniendo cuidado de no trabajar demasiado la superficie. Es preciso retirar, por lo menos, 2.5×10^{-3} mm (0.0001 in) o 1.5 a 2.3 mg/cm^2 (10 a 15 mg/in^2). Si se van a utilizar especímenes de aleaciones revestidas, se debe prestar una atención especial para asegurarse de que no se elimine metal en exceso. Después de la preparación final de la superficie del espécimen, los especímenes se deben almacenar en un desecador hasta la exposición, cuando no se utilicen inmediatamente.

Los especímenes se deben desengrasar finalmente frotándolos con polvo limpiador, sin blanqueador, seguido por el enjuagado completo en agua y un disolvente apropiado (que puede ser acetona, metanol o una mezcla de 50% de metanol y 50% de éter) y la desecación al aire. Para los metales relativamente blandos, como el aluminio, el magnesio y el cobre, no siempre se necesita la frotación con un polvo abrasivo, que podría rayar la superficie del espécimen. El empleo de toallas para la desecación puede introducir un error debido a la contaminación de los especímenes con grasa o pelusa. El espécimen desecado se deberá pesar en una balanza analítica.

Aparatos Se debe utilizar un aparato adaptable y conveniente, que consiste en una caldera o un matraz de tamaño adecuado (casi siempre de 500 a 5000 ml), un condensador de reflujo con sello atmosférico, un aspersor para controlar la atmósfera o la aireación, un dispositivo regulador de la temperatura, un dispositivo calentador (baño, placa caliente o manto) y un sistema de soporte del espécimen. Si se requiere agitación, el aparato se puede modificar para aceptar un mecanismo de agitación adecuado, que puede ser un agitador magnético. En la figura 23-3 se muestra una configuración típica de un matraz de

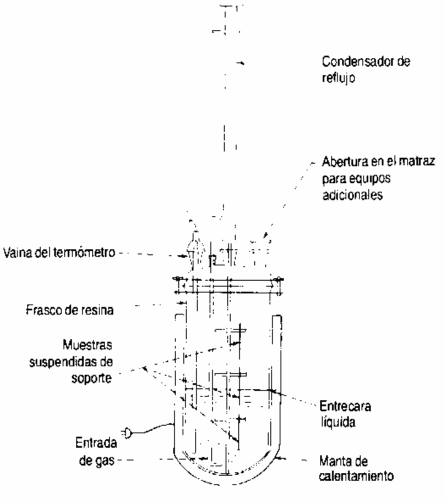


FIG. 23-3 Disposición de equipos de laboratorio para efectuar pruebas de corrosión (Basada en *NACE Standard TM-01-69*).

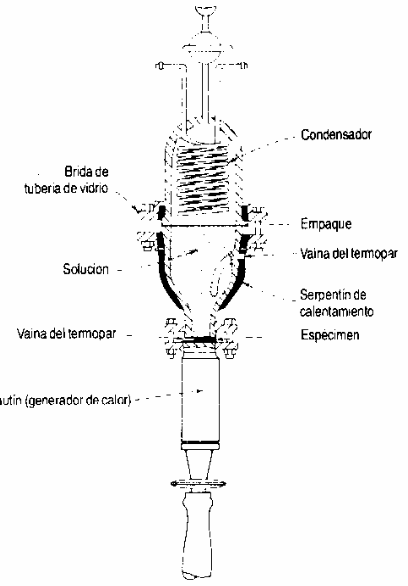


FIG. 23-4 Dispositivo de laboratorio para pruebas de corrosión de materiales de transferencia de calor.

resina para este tipo de prueba. Las pruebas en vasos picudos abiertos no se deben utilizar, debido a la evaporación y la contaminación.

En otras pruebas más complejas, se deben tomar disposiciones para el flujo continuo o del líquido corrosivo, mientras se mantiene simultáneamente una atmósfera controlada.

En la figura 23-4 se muestra un aparato para la prueba de materiales para aplicaciones de transferencia de calor. En este caso, la muestra está a una temperatura más alta que la del volumen de la solución.

Si la prueba va a ser una guía para seleccionar un material con un fin determinado, será preciso determinar los límites de los factores de servicio controlantes. Esos factores incluyen la concentración de oxígeno, la temperatura, la velocidad del flujo, el valor de pH y otras características importantes.

La composición de la solución de prueba debe ser controlada tanto como se pueda y describirse en la forma más completa y exacta como sea factible, cuando se den los resultados. No se deben pasar por alto los constituyentes menores, porque con frecuencia afectan las velocidades de corrosión. El contenido químico se dará como porcentaje en peso de la solución. También resultan útiles la molaridad y la normalidad para definir la concentración de productos químicos en la solución de prueba. La composición de la solución de prueba se debe verificar mediante un análisis al final del ensayo, con el fin de determinar la amplitud del cambio de composición como el que se produce debido a la evaporación.

Temperatura de la solución La temperatura de la solución corrosiva se debe controlar dentro de un nivel de ± 1°C (±1.8°F) y enunciarse en el informe de los resultados de prueba.

Para pruebas a la temperatura ambiente, los análisis se deben efectuar a la temperatura más alta que se espere para el almacenado sin movimiento en los meses del verano. Esta temperatura puede ser de 40 a 45°C (104 a 113°F) en algunos lugares. También se reportará la variación de temperatura (p. ej., 40°C ± 2°C).

Aireación de la solución A menos que se especifique, la solución no se aireará. La mayor parte de las pruebas relacionadas con equipos de procesamiento se deben efectuar con la atmósfera natural inherente en el proceso, que pueden ser los vapores del líquido en ebullición. Si se emplea aireación, no se deben poner los especímenes en la corriente directa de aire del aspersor. Se pueden encontrar efectos extraños cuando la corriente de aire choque con los especímenes.

Velocidad de la solución El efecto de la velocidad no se determina, por lo común, en pruebas de laboratorio, aun cuando se han diseñado pruebas específicas con ese fin. Sin embargo, para facilitar la reproductibilidad, es conveniente tener cierto control de la velocidad.

Las pruebas en el punto de ebullición se deben llevar a cabo con el suministro mínimo posible de calor y utilizarse virutas en la ebullición para evitar la turbulencia excesiva y el choque de burbujas. En pruebas realizadas por debajo del punto de ebullición, la convección térmica es, en general, la única fuente de velocidad del líquido. En soluciones de prueba de viscosidades altas se recomienda la agitación controlada suplementaria con un agitador magnético.

Volumen de la solución El volumen de la solución de prueba tiene que ser suficientemente grande para evitar cualquier cambio apreciable de la corrosividad, debido al agotamiento de los constituyentes corrosivos o a la acumulación de productos de la corrosión que puedan afectar el avance de la corrosión.

Una relación adecuada de volumen a área es de 20 ml/cm^2 (125 ml/in^2) de solución/relación de superficie del espécimen. Éstos corresponden a la recomendación de la norma A262 de la ASTM, para la prueba de Huey. La relación preferida de volumen a área es de 40 ml/cm^2 (250 ml/in^2) de superficie del espécimen, como se estipula en la norma ASTM Standard G31, Laboratory Immersion Testing of Materials.

Método de soporte de muestras El dispositivo de soporte y el recipiente no deben ser afectados por la solución de prueba ni provocar la contaminación de esta última. El método de sostén de las muestras variará con el aparato utilizado para la realización de la prueba; pero se debe diseñar de modo que aísle las muestras unas de otras, desde el punto de vista físico y eléctrico y que aísle las muestras de cualquier recipiente metálico o dispositivo de soporte utilizado junto con el aparato.

La forma del soporte de la muestra debe asegurar el contacto libre de esta última con la solución corrosiva, la línea de líquido o la fase de vapor, como se muestra en la figura 23-3. Si las aleaciones revestidas quedan expuestas, se requieren procedimientos especiales para asegurar que sólo se exponga el revestimiento (a menos que la finalidad sea probar la capacidad del revestimiento para proteger los bordes de corte de la solución de prueba). Algunos soportes más comunes son varillas de vidrio o cerámica, albardillas de vidrio, ganchos de vidrio, resortes de plástico y fluorocarbono y varios soportes metálicos aislados o recubiertos.

Duración de la prueba Aun cuando la duración de cualquier prueba se determina por su naturaleza y su finalidad, un procedimiento excelente para evaluar el efecto del tiempo sobre la corrosión del metal y también de la corrosividad del ambiente en las pruebas de laboratorio, lo presentaron Wachter y Treseder [*Chem. Eng. Prog.*, págs. 315-326 (junio, 1947)]. Esta técnica se denomina **prueba de intervalo cepillado**. Otros procedimientos que requieren el retiro de productos sólidos de corrosión entre periodos de exposición no medirán con exactitud los cambios normales de la corrosión con el tiempo.

Los materiales que experimentan una corrosión importante no necesitan por lo común pruebas prolongadas para obtener velocidades de corrosión precisas. Aun cuando esta suposición es válida en muchos casos, tiene sus excepciones. Por ejemplo, el plomo expuesto al ácido sulfúrico se corroe con velocidad muy alta al principio, mientras acumula una película de protección y, en seguida, la velocidad disminuye considerablemente, de modo que la corrosión posterior es despreciable. El fenómeno de la formación de una película de protección se observa en muchos materiales resistentes a la corrosión y, por consiguiente, las pruebas breves con esos materiales indicarán velocidades de corrosión elevadas y serán totalmente engañosas.

Asimismo, las pruebas de corta duración pueden proporcionar resultados engañosos cuando se trate de aleaciones que formen películas pasivas, como los aceros inoxidables. Con condiciones limítrofes, se puede requerir una prueba prolongada para permitir la ruptura de la película pasiva y, por lo tanto, un ataque más rápido. En consecuencia, las pruebas efectuadas durante periodos prolongados son bastante más reales que las de corta duración. Esta afirmación se debe suavizar, indicando que la corrosión no debe proseguir hasta el punto en que el tamaño original de la muestra o la zona expuesta se reduzca en forma violenta o que se perfore el metal.

Si las velocidades de corrosión esperadas son moderadas o bajas, la ecuación que sigue da una duración recomendada de la prueba.

$$\text{Duración de la prueba (h)} = \frac{78\,740}{\text{velocidad de corrosión (mm/año)}}$$

$$= \frac{2000}{\text{velocidad de corrosión (mils/año)}}$$

Limpieza de muestras después de la prueba Antes de limpiar las muestras, es preciso observar y tomar nota de su aspecto. La ubicación de los depósitos, las variaciones en los tipos de depósitos y las de los productos de corrosión son extremadamente importantes para evaluar la corrosión localizada, como las picaduras y el ataque en celdas de concentración.

La limpieza de las muestras después del ensayo es una etapa vital en el procedimiento de prueba de corrosión y si no se realiza adecuadamente, pueden obtenerse resultados engañosos de la prueba. En general, el procedimiento de limpieza debe retirar todos los productos de corrosión de las muestras con una eliminación mínima de metal sano. No se pueden aplicar reglas fijas a la limpieza, ya que los procedimientos variarán según el tipo de metal que se limpie y el grado de adherencia de los productos de corrosión.

La **limpieza mecánica** incluye la frotación, el raspado, el cepillado, el golpeteo mecánico y procedimiento ultrasónico. La frotación con un cepillo de cerdas y un producto abrasivo suave es el método más utilizado; los otros se utilizan primordialmente como complemento para retirar productos de corrosión muy encostrados, antes de la limpieza por frotación. Se debe tener cuidado para evitar retirar metal sano.

La **limpieza química** implica la eliminación de material de la superficie de la muestra por disolución en un agente químico apropiado. Se emplean disolventes como acetona, tetracloruro de carbono y alcohol para eliminar aceites, grasas o resinas y se aplican por lo común antes de los otros métodos de limpieza. Se escogen diversos productos químicos para la aplicación a materiales específicos; en la norma de la NACE aparecen algunos de esos tratamientos que se utilizan en general.

La **limpieza electrolítica** debe ir precedida por la frotación para retirar productos de corrosión adheridos débilmente. Uno de los métodos de limpieza electrolítica que se ha descubierto que es útil para muchos metales y aleaciones es el siguiente:

Solución: 5% (por peso) de H_2SO_4
Ánodo: carbono o plomo
Cátodo: espécimen de prueba
Densidad de corriente del cátodo: 20 A/dm^2 (129 A/in^2)
Inhibidor: 2 cm^3 de inhibidor orgánico por litro
Temperatura: 74°C (165°F)
Periodo de exposición: 3 minutos

Se debe tener precaución para asegurar un buen contacto eléctrico con la muestra, evitar la contaminación de la solución con iones metálicos fácilmente reducibles y para asegurar que no se produzca una descomposición del inhibidor. En lugar de utilizar 2 ml de cualquier inhibidor se pueden emplear 0.5 g/l de inhibidores, como tiourea diortotolítica o etiyoduro de quinoleína.

Sea cual sea el tratamiento que se utilice para limpiar muestras después de una prueba de corrosión, se debe determinar su efecto de retiro de metal y corregir en consecuencia la pérdida de peso. Una muestra "blanco" se debe pesar antes y después de la exposición al procedimiento de limpieza, con el fin de establecer la pérdida de peso.

Evaluación de r
sido repesados se d
lizado, como las pi
lerada por el esfuer
nular deberán me
afectada.
La profundidad
el periodo real de
una relación anual
picaduras es raras
ción de las picadu
que se producen p
concentración) y l
a la solución de pr
corrosión con fo
1950)].
La muestra se de
minar si se ha prod
Suponiendo que
sente o se registre
sión o penetración

Pérd
(Área) (tien

Pérdid
(Área) (tiem

en donde las pérd
pulgadas cuadrad
ras de exposición
aleaciones se pued
nuales sobre metal
La lista de **veri**
reportar toda la **in**
Medios corrosi
Volumen de la s
Temperatura (m
Aireación (desc
Agitación (desc
Tipo de aparato
Duración de ca
Composición q
Forma y condic
Tamaño exacto
Tratamiento uti
Número de mu
separado o qué m
Método utiliza
ción y la amplitu
tratamiento.
Pérdidas reales
Evaluación del
tas bajo las varill
picaduras y los re
flexibilidad.
Las velocidade
límetros (mils) p
Efecto de las v
sejable aplicar un
factor varía con e
tados. Por lo com
Entre los punt
tratar de basar el d
obtenidos en el la
La corrosión
gran escala. No se

Evaluación de resultados Después de que los especímenes han sido repesados se deben examinar cuidadosamente. El ataque localizado, como las picaduras, la corrosión por grieta, la corrosión acelerada por el esfuerzo, fractura por corrosión o la corrosión intergranular deberán medirse tanto en su profundidad como en el área afectada.

La profundidad de la corrosión localizada deberá informarse para el periodo real de prueba y no deberá interpolarse o extrapolarse a una relación anual. La velocidad de iniciación o propagación de las picaduras es raras veces uniforme. El tamaño, la forma y la distribución de las picaduras se deben anotar. Es preciso distinguir entre las que se producen por debajo de los dispositivos de soporte (celdas de concentración) y las que están en superficies expuestas libremente a la solución de prueba. Se ha publicado un análisis excelente de la corrosión con formación de picaduras [*Corrosion*, 25t (enero, 1950)].

La muestra se debe someter a pruebas de flexión simple para determinar si se ha producido o no **fragilidad.**

Suponiendo que la corrosión localizada interna no se encuentre presente o se registre por separado en el informe, la **velocidad de corrosión** o penetración se puede calcular alternativamente como sigue:

$$\frac{\text{Pérdida de peso} \times 534}{(\text{Área})\ (\text{tiempo})\ (\text{densidad del metal})} = \text{mils/año (mpy)}$$

$$\frac{\text{Pérdida de peso} \times 13.56}{(\text{Área})\ (\text{tiempo})\ (\text{densidad del metal})} = \text{mm/año (mmpy)}$$

en donde las pérdidas de peso se dan en miligramos, el área está en pulgadas cuadradas de superficie metálica expuesta, el tiempo en horas de exposición y la densidad está en g/cm^3. Las densidades para las aleaciones se pueden obtener de los productores o de los diversos manuales sobre metales.

La lista de **verificación** que sigue es una guía recomendada para reportar toda la **información importante y los datos** adecuados:

Medios corrosivos y su concentración (cambios durante la prueba).
Volumen de la solución de prueba.
Temperatura (máxima, mínima y promedio).
Aireación (descríbanse las condiciones o la técnica).
Agitación (descríbanse las condiciones o la técnica).
Tipo de aparato utilizado para la prueba.
Duración de cada prueba (iniciación, final).
Composición química o nombre comercial de los metales probados.
Forma y condiciones metalúrgicas de las muestras.
Tamaño exacto, forma y área de las muestras.
Tratamiento utilizado para preparar las muestras para la prueba.
Número de muestras de cada material probado y si se probaron por separado o qué muestras se probaron en el mismo recipiente.
Método utilizado para limpiar las muestras después de la exposición y la amplitud de cualquier error esperado por medio de este tratamiento.
Pérdidas reales de peso de cada muestra.
Evaluación del ataque, si no es general, como la corrosión por grietas bajo las varillas de soporte, la distribución y la profundidad de las picaduras y los resultados del examen microscópico o las pruebas de flexibilidad.
Las velocidades de corrosión para cada muestra, expresadas en milímetros (mils) por año.

Efecto de las variables sobre las pruebas de corrosión Es aconsejable aplicar un factor de seguridad a los resultados obtenidos; dicho factor varía con el grado de seguridad en la aplicabilidad de los resultados. Por lo común, se puede considerar normal un factor de 3 a 10.

Entre los puntos más importantes que se deben tomar en cuenta al tratar de basar el diseño de planta en datos de la velocidad de corrosión, obtenidos en el laboratorio, son los siguientes:

La corrosión galvánica Es una causa frecuente de dificultades en gran escala. No sólo es peligroso el empleo de diferentes metales en el mismo equipo, sino que el efecto del trabajo en frío puede ser suficientes para establecer diferencias potenciales de magnitud objetable entre las diferentes partes de una misma pieza metálica. La masa de metal de los aparatos químicos es por lo común tan grande y, en consecuencia, la resistencia eléctrica tan baja, que un voltaje muy pequeño puede causar una corriente muy alta. También la soldadura puede dejar junta de composición química o física diferente de la del cuerpo de la lámina y provocar el desarrollo de corrosión localizada.

Tanto las variaciones locales de temperatura como las grietas que permiten la acumulación de productos de la corrosión, pueden facilitar la formación de **celdas de concentración** con el resultado de que se acelera la corrosión local.

En el laboratorio, la **temperatura** del espécimen de prueba es la del líquido en el cual se sumerge y la temperatura medida es, en realidad, aquélla a la que tiene lugar la reacción. En la planta (puesto que el calor se proporciona con frecuencia al líquido a través del metal), la temperatura de la película de líquido (corrosivo) en la parte interior del recipiente puede estar a cierto número de grados por encima de la que registra el termómetro. Puesto que la relación entre temperatura y corrosión es logarítmica, el índice de incremento es muy rápido. Al igual que otras reacciones químicas, la velocidad aumenta por lo común de dos a tres veces por cada elevación de 10 grados centígrados de temperatura; la relación real es la ecuación: $\log K = A + (B/T)$, en donde K representa la velocidad de corrosión y T, la temperatura absoluta. Se debe entender que esta relación, aun cuando se expresa matemáticamente, es cualitativa en vez de estrictamente cuantitativa.

Paredes frías En los enfriadores o condensadores se tiene, generalmente, una velocidad de corrosión disminuida en cierto grado, por la razón que se acaba de describir. Sin embargo, en algunos casos, el decremento de la temperatura puede permitir la formación de una segunda fase todavía más corrosiva, aumentándose con esto la corrosión.

El efecto de las **impurezas** en el material estructural o el corrosivo es tan marcado (mientras que, al mismo tiempo, puede ser de aceleración o desaceleración), que para obtener resultados confiables se deben probar los materiales reales que se vayan a utilizar y no tipos similares de esos materiales. En otras palabras, es mucho más conveniente probar la solución real de la planta y el metal o el no-metal real que depender de una duplicación de cualquiera de esos materiales. Puesto que las cantidades de sólo 0.01% de ciertos compuestos orgánicos reducirán el índice de solución del acero en ácido sulfúrico en un 99.5% y que 0.05% de bismuto en plomo incrementará la velocidad de corrosión a más del 1000% en ciertas condiciones, se puede entender lo difícil que sería tratar de duplicar todos los constituyentes importantes.

PRUEBAS DE CORROSIÓN EN PLANTAS

No siempre resulta práctico o conveniente investigar problemas de corrosión en el laboratorio. En muchos casos es difícil descubrir cuáles son las condiciones de servicio y reproducirlas con exactitud. Esto sucede especialmente en el caso de los procesos que incluyen cambios en la composición y otras características de las soluciones, a medida que avanza el proceso, como, por ejemplo, en la evaporación, la destilación, la polimerización, la sulfonación o la síntesis.

En el caso de muchas sustancias naturales, no se sabe con seguridad la naturaleza exacta del corrosivo y está sujeta a cambios que no se pueden controlar con facilidad en el laboratorio. En otros casos, la corrosividad de la solución se puede ver afectada considerablemente o, incluso, deberse primordialmente a un constituyente presente en proporciones tan pequeñas que la masa disponible en el volumen limitado de solución corrosiva que se puede utilizar en una configuración de laboratorio, se agotaría por la reacción de corrosión a comienzos de la prueba, y por consiguiente, los resultados obtenidos durante un periodo prolongado serían engañosos.

Otra dificultad que se encuentra a veces en las pruebas de laboratorio, es que la contaminación de la solución de prueba por productos de corrosión puede cambiar su naturaleza corrosiva hasta un punto apreciable.

En esos casos suele ser preferible llevar a cabo el programa de pruebas de corrosión al exponer especímenes en equipos operacionales en las **condiciones reales de servicio**. Este procedimiento tiene las ventajas adicionales de que es posible probar gran número de especímenes al mismo tiempo y requiere poca supervisión técnica.

En algunos casos es necesario seleccionar materiales para equipos que se utilizarán en un proceso desarrollado en el laboratorio y que todavía no se aplique a escala de planta. En esas circunstancias resultará evidentemente imposible efectuar pruebas en las plantas. En ese caso, un buen procedimiento es construir una planta piloto, utilizando los materiales más baratos que se encuentren disponibles u otros materiales escogidos sobre la base de experiencias obtenidas anteriormente o pruebas de laboratorio. Mientras que la planta piloto funciona para verificar el proceso mismo, los especímenes se pueden exponer en el equipo operacional como guía para la elección de materiales para la planta en gran escala, o bien, como medio para confirmar lo adecuado de los materiales seleccionados para la planta piloto.

Muestras para prueba Al efectuar pruebas en las plantas es necesario instalar las muestras de prueba de tal modo que no entren en contacto con otros metales y otras aleaciones. Esto evita que su conducta normal se vea alterada por los efectos galvánicos. También es conveniente proteger las muestras contra los daños mecánicos posibles.

No hay ningun tamaño ni ninguna forma estándar para las muestras de acero en las pruebas de corrosión. Suelen pesar de 10 a 50 g y tienen, de preferencia, una relación grande de superficie a masa. Los más comunes son los discos de 40 mm ($1\,^1/_2$ in) de diámetro por 3.2 mm ($^1/_8$ in) de espesor y las muestras cuadradas y rectangulares de dimensiones similares. La preparación de la superficie varía con la finalidad de la prueba, pero es común el esmerilado mecánico de la superficie o el pulido con un abrasivo del número 120. Las muestras no deben tener bordes cizallados, estarán limpias (sin que queden incrustaciones de tratamiento térmico, a menos que formen específicamente parte de la prueba) y se tendrán que identificar por medio del estampado. En la figura 23-5 se muestra un conjunto usual de pruebas en plantas.

La selección de los materiales con los que se va a construir el soporte de las muestras es de importancia. Los materiales deben ser bastante resistentes para asegurar que la prueba se lleve hasta su terminación de una manera satisfactoria. La selección de materiales de gran resistencia para el conjunto de pruebas constituye una buena práctica. Los materiales aislantes que se emplean son plásticos, porcelana, teflón y vidrio. Un plástico fenólico responde a la mayor parte de los propósitos, pero tiene la limitación de que no es adecuado para utilizarse a temperaturas por encima de 150°C (300°F), además de carecer de la resistencia adecuada a los álcalis concentrados.

La forma de sostener el portamuestras durante el periodo de prueba es muy importante. La posición preferida es con el eje longitudinal del soporte en posición horizontal, para evitar el goteo de los productos de corrosión de un espécimen a otro. El soporte se debe situar para que cubra las condiciones de exposición que se van a estudiar. Quizá se tenga que sumergir, o bien exponerse sólo a los vapores, situarse al nivel del líquido, o utilizar soportes para las tres ubicaciones. Se han utilizado diversos medios para sostener los soportes en líquidos o vapores. El más simple es suspender el soporte por medio de una cadena metálica ligera o un alambre grueso. Se han sujetado soportes entre serpentines de calentamiento, se han fijado a ejes de agitadores, soldado a espejos de evaporador, etc. El mejor método es utilizar gradillas de laboratorio.

En casos especiales, el portamuestras de "tipo carrete" no es aplicable y se debe establecer una forma especial, adecuada a la prueba, para aplicarlo a las condiciones de corrosión en estudio.

Para realizar pruebas en **líneas de tubería** de 75 mm (3 in) de diámetro, o mayores, se ha utilizado, como se muestra en la figura 23-6, un soporte de carrete que emplea los mismos especímenes de tipo de disco utilizados en el soporte de carrete estándar. Esa armazón está diseñada de tal modo que se puede situar en una línea de tuberías en cualquier posición, sin permitir que los especímenes en forma de discos toquen las paredes de la tubería. Al igual que en el tipo de soporte de banda, esta configuración no interfiere materialmente con el flujo del fluido por la tubería y permite el estudio de los efectos de corrosión que prevalecen en la línea de tuberías.

Otra forma de estudiar la corrosión en línea de tubería consiste en instalar en la línea secciones cortas de tubería de los materiales que se van a probar. Esas secciones de prueba deben aislarse unas de otras y del resto del sistema de tuberías por medio de acoplamientos no metálicos. También es una buena práctica colocar empaques aislantes en los extremos de los especímenes de tuberías, cuando se encuentren en el interior de los acoplamientos. Esas juntas se pueden sellar con diversos tipos de cemento o "compuesto". En algunos casos es conveniente pintar el exterior de las muestras para limitar la corrosión a las superficies internas.

A veces es conveniente exponer las muestras de pruebas de corrosión de equipos en operación sin el uso de portamuestras del tipo descrito. Esto se puede realizar fijando los especímenes directamente en alguna parte del equipo en operación, y proporcionando el aislamiento necesario contra los efectos galvánicos, como se muestra en la figura 23-7. Se ha descubierto que la forma recomendada para sujetar muestras a gradillas o soportes es muy adecuada para la exposición de los especímenes a la corrosión en agua de mar.

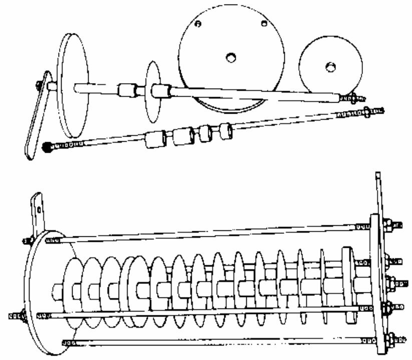


FIG. 23-5 Conjunto de carrete de pruebas de corrosión y muestras [Mantell (ed.), *Engineering Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1958].

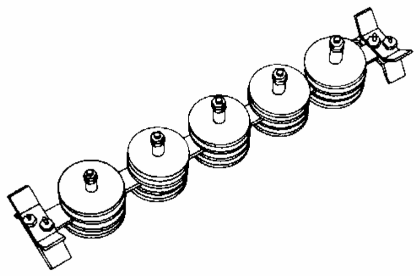


FIG. 23-6 Portamuestras del tipo de carrete para uso en una tubería de 3 in de diámetro o mayor [Mantell (ed.), *Engineering Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1958].

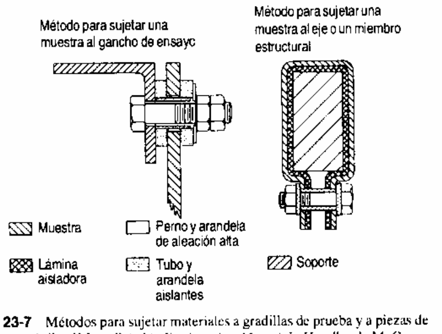


FIG. 23-7 Métodos para sujetar materiales a gradillas de prueba y a piezas de equipos móviles [Mantell (ed.), *Engineering Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1958].

Resultados de pruebas Los métodos para limpiar muestras después de la prueba, analizados en relación con las pruebas de corrosión de laboratorio, se pueden aplicar también a las muestras de prueba de corrosión en plantas.

NUEVOS MÉTODOS DE PRUEBA DE CORROSIÓN

Método de resistencia eléctrica Si una muestra de prueba de corrosión está en forma de fleje o alambre delgado, su resistencia eléctrica aumenta a medida que la corrosión disminuye su sección transversal. Por consiguiente, se puede utilizar, para vigilar la corrosión, una medición periódica o continua de la resistencia longitudinal del espécimen. La medición de la resistencia eléctrica no tiene ninguna relación con la electroquímica de la reacción de corrosión. Se limita a medir una propiedad volumétrica que depende del área de sección transversal del espécimen. Existen para ello instrumentos comerciales (Fig. 23-8).

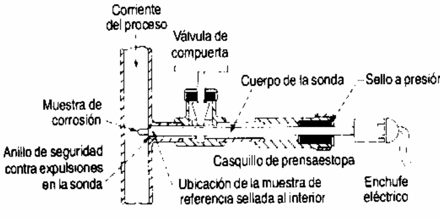


FIG. 23-8 Sonda retractable usual de corrosión.

Las **ventajas** de la técnica de resistencia eléctrica son:

1. Se puede medir la corrosión sin tener que ver ni retirar la muestra.

2. Se pueden hacer mediciones rápidas de la corrosión, en unas horas o días o en forma continua. Esto permite que se detecten los incrementos repentinos de la velocidad de corrosión. En algunos casos, será posible modificar a continuación el proceso para disminuir la corrosión.

3. Se puede utilizar el método para vigilar un proceso, con el fin de indicar si la velocidad de corrosión depende de algunas variables fundamentales del proceso.

4. El material corrosivo no tiene que ser un electrólito (de hecho, no tiene necesariamente que ser líquido).

5. El método puede detectar velocidades bajas de corrosión que requerirían mucho tiempo para su determinación por métodos de pérdida de peso.

Las **limitaciones** de la técnica son:

1. Se limita por lo común a la medición de la corrosión uniforme y no resulta completamente satisfactoria para la corrosión localizada.

2. El diseño de este sistema de prueba deberá tener la forma adecuada para compensar variaciones de temperatura. Estos diseños han demostrado no tener éxito completo. Los resultados más confiables son aquellos que se obtienen en sistemas a temperatura constante.

Método de polarización lineal La técnica de polarización lineal (o la resistencia a la polarización) da la velocidad de corrosión en un minuto, aproximadamente, sin necesidad de ninguna medición anterior. Este método se utiliza mucho en la actualidad para vigilar la corrosión en las plantas. Existen instrumentos comerciales y algunos dan una lectura directa (registro semicontinuo, si se desea).

La técnica depende de que la corrosión sea de naturaleza electroquímica. Se mide la cantidad de corriente externa necesaria para modificar en unos cuantos milivolts (por lo común 10 mV) el potencial de corrosión de un espécimen que se corroa libremente. Esta corriente se relaciona con la de corrosión y, por consiguiente, con la velocidad de corrosión de la muestra. Si el metal se corroe con rapidez, se necesitará una corriente externa considerable para modificar su potencial y viceversa.

El sistema de medición consiste en cuatro elementos básicos:

1. *Electrodos* Electrodos de referencia y prueba y, en algunos casos, un electrodo auxiliar.

2. *Sonda* Conecta los electrodos en el material corrosivo, en el interior del recipiente, a los conductores eléctricos.

3. *Conductores eléctricos* Van de la sonda a la fuente de corriente y al tablero de instrumentos.

4. *Sistema de control* Fuente de corriente (pilas), amperímetro, tablero de instrumentos, etc.

Los instrumentos comerciales tienen dos o tres electrodos. Asimismo, hay diferentes tipos de sistemas de tres electrodos. La aplicación y las limitaciones de los instrumentos dependen, en gran parte, de esos sistemas de electrodos.

Pruebas electroquímicas de corrosión La aplicación de los métodos electroquímicos a problemas prácticos de corrosión (sistemas diferentes a los sistemas de protección catódica, cuyo empleo ha quedado bien establecido durante años de aplicación) es un fenómeno que se ha presentado recientemente.

En la actualidad ha quedado claro que la actividad de la corrosión por picaduras, la corrosión por grietas y la fractura de corrosión por esfuerzo depende fundamentalmente del potencial de corrosión (p. ej., la diferencia de potencial entre el metal que se corroe y un electrodo de referencia adecuado). Con el empleo de equipo electrónico que se puede conseguir fácilmente, la cantidad y la dirección de la corriente directa que se requiere para controlar el potencial de corrosión en una solución determinada en un valor seleccionado puede medirse con toda facilidad. Una gráfica de estos valores en un intervalo de potenciales se conoce como un diagrama de polarización. Con el empleo de las técnicas experimentales apropiadas es posible definir los intervalos aproximados del potencial de corrosión en los que las picaduras, la corrosión por grieta y la fractura de corrosión por esfuerzo pueden ocurrir o dejar de hacerlo. Con el diseño adecuado en los sistemas de prueba, estas técnicas se pueden aplicar en las pruebas de campo y de laboratorio.

Para una información más detallada se recomiendan las siguientes referencias: Martin, "Potentiodynamic Polarization Studies in the Field", *Mater. Prot.*, **18,** 41-50 (marzo, 1979). Morris, "Use of Rapid-Scan Potentiodynamic Techniques to Evaluate Pitting and Crevice Corrosion Resistance", *Galvanic and Pitting Corrosion*, STP 576, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1976. Morris y Scarberry, "Predicting Corrosion Rates with the Potentiostat", *Corrosion*, **28,** 444-452 (diciembre, 1972).

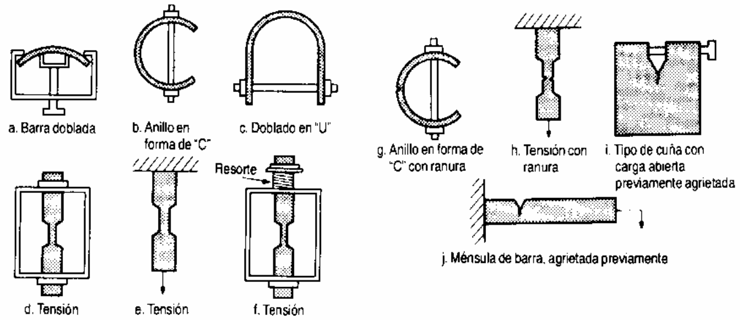


FIG. 23-9 Muestras para la prueba de corrosión por esfuerzo en diversas formas. [*Chem. Eng.*, **78**, 159 (Sept. 20, 1971).]

Pruebas de fractura de corrosión por esfuerzo Muestras que se han sometido a esfuerzos previos como los que se muestran en la figura 23-9, se han utilizado en pruebas de campo y de laboratorio para el estudio de la fractura de corrosión por esfuerzo. La variable que se ha observado es "el tiempo necesario para que se presente la fractura o para que una fractura se haga visible". Desgraciadamente, estas pruebas no pueden proporcionar una aceleración en la presentación de la fractura.

Como la fractura de corrosión por esfuerzo muestra con frecuencia periodos de inducción bastante prolongados (que van de meses a años), las pruebas practicadas deberán llevarse a cabo en periodos igualmente prolongados antes de emitirse conclusiones veraces.

Todavía hay mucho trabajo por hacer para evaluar los novísimos conceptos que se listan en seguida; sin embargo, promete lograr datos confiables en periodos más cortos y, en consecuencia, serán más prácticos.

1. *Prueba de velocidad de carga lenta* Implica una prueba de tensión muy lenta con la muestra por probar expuesta al ambiente de interés. Las velocidades usuales de carga que se emplean corresponden al nivel de $1 \times 10^{-4}\ s^{-1}$ a $1 \times 10^{-9}\ s^{-1}$. La fractura de corrosión por esfuerzo se detectará por la desviación de la curva de tensión-deformación con respecto a aquélla que se observa en un ambiente no corrosivo. Esta técnica se ha aplicado con eficacia a muchos problemas prácticos. (Para más detalles, véase *Stress Corrosion Cracking, The Slow Strain Rate Technique*, STP 665, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1979.)

2. *Métodos electroquímicos* Estos métodos implican el empleo de verificación o control del potencial de corrosión en un valor seleccionado (ver la subsección "Pruebas electroquímicas de corrosión") en conjunción con varios métodos de aplicación de esfuerzo. Han demostrado su utilidad en pruebas de aceleración y en la definición del intervalo de potenciales de corrosión en los cuales la fractura de corrosión por esfuerzo puede presentarse en un sistema determinado. Estos métodos pueden utilizarse junto con la prueba de velocidad de carga lenta.

3. *Métodos de fractura mecánica* Han resultado de gran utilidad para definir la intensidad mínima de esfuerzo (K_{ISCC}) a la que ocurrirá la fractura de corrosión por esfuerzo en aleaciones de alta resistencia de baja ductibilidad. Sin embargo, no se han tenido mucho éxito cuando se utiliza el método con aleaciones de gran ductibilidad que, como se sabe, se usan extensamente en la industria química.

El trabajo en relación con estas nuevas técnicas, y otras más, continúa y se confía en que se definirán en breve pruebas aceleradas que sean confiables.

FACTORES ECONÓMICOS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

En la mayor parte de los casos existe más de un material que se puede emplear alternativamente y que se debe considerar para una aplicación específica. Los cálculos de los costos reales a largo plazo requerirán la estimación de los siguientes aspectos:

1. Costo total de la fabricación de equipo y tubería
2. Costo de instalación
3. Duración de servicio
4. Costos de mantenimiento: cantidad y tiempo
5. Requerimientos de tiempo y costo para reemplazar o reparar al finalizar la duración de servicio
6. Tiempos muertos para reemplazos o reparaciones
7. Costo de inhibidores, servicios de control adicionales, etc., para alcanzar la duración de servicio estimada
8. Valor del dinero en el tiempo
9. Factores que inciden en el pago de contribuciones, como la depreciación y las variaciones en los impuestos
10. Tasa inflacionaria

Un análisis económico apropiado permitirá la comparación de las diversas alternativas con bases firmes. Los cálculos detallados de este aspecto escapan al propósito de esta sección. El lector encontrará un método adecuado si revisa el material de la Sec. 25 de Standard NACE RP-02-72 (Direct Calculation of Economic Appraisals of Corrosion Control Measures, National Association of Corrosion Engineers, Houston).

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

GUÍA PARA DATOS TABULADOS

De conformidad con el tema establecido en la subsección anterior sobre la corrosión y su control, en ésta, que se ocupa de las propiedades de los materiales, se hará hincapié en su resistencia a la corrosión. Puesto que hay muchas otras propiedades que deben considerarse al seleccionar materiales de construcción, se cubren también las propiedades físicas y mecánicas.

A continuación, se da un análisis general de las propiedades de diversos materiales, agrupados por tipos. La información que se presenta

sobre las propiedade
desde la 23-2 a la 23
específicamente con
parte final de la secci

NORMAS Y ES

Son obvios los benef
mo normas, que def
específicos. Dichas
los usuarios trabajen
piedades de los mate
rios tendrán tambié
comparativamente i
res. A su vez, los pro
que los materiales q
drán un mercado di
ciencia en grandes e
Un tratamiento en
sección, por lo que
zaciones encargadas
industria química e
instituciones se enc
(3a. ed., Wiley, New
1. American N
nalmente fue la Am
el que promulga los
procesos químicos.
2. American S
sociedad genera los
and Pressure Vessel
3. American S
sociedad genera las
riales utilizados de
ping Codes y para
ASME, Boiler and
4. Internation
organismo contribu
Cuenta con 80 nacio

ALEACIONES

Acero El acero
los metales que se e
celente, lo que perm
do en frío. El acero
Los grados de ac
de procesos químic
nivel de 345 a 485
dad. Es posible alc
trabajado en frío, c
El acero al carb
común en las plant
tencia a la corrosió
habitual con la ma
y con soluciones a
das. También se en
rico y sosa cáustic
(130°F)]. Debido a
fabricación sencill
que presentan velo
20 mils/año) con
sión) para asegura
mientos de calidad
mente en tales cas

sobre las propiedades de materiales se da en una serie amplia de tablas, desde la 23-2 a la 23-33. Hay información adicional que se relaciona específicamente con materiales para temperaturas bajas y altas en la parte final de la sección 23.

NORMAS Y ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

Son obvios los beneficios que se derivan del consenso establecido como normas, que definen las propiedades y la química de materiales específicos. Dichas normas permiten que tanto los diseñadores como los usuarios trabajen con confianza y obtengan como mínimo las propiedades de los materiales especificados. Los diseñadores y los usuarios tendrán también la certidumbre de que los materiales serán comparativamente iguales aunque se compren a diferentes proveedores. A su vez, los productores de materiales podrán también confiar en que los materiales que producen dentro de una norma aceptada, tendrán un mercado disponible y por esto mismo los producen con eficiencia en grandes empresas.

Un tratamiento en detalle de este aspecto escapa al objetivo de esta sección, por lo que se proporciona una lista de algunas de las organizaciones encargadas de emitir normas de la mayor importancia para la industria química en Estados Unidos. Un resumen excelente de estas instituciones se encuentra en la *Encyclopedia of Chemical Technology* (3a. ed., Wiley, New York, 1978-1980).

1. **American National Standards Institute (ANSI)**, que originalmente fue la American Standards Association (ASA). El ANSI es el que promulga los códigos de tubería utilizados en las industrias de procesos químicos.
2. **American Society of Mechanical Engineers (ASME)**. Esta sociedad genera los códigos de calderas y recipientes a presión (Boiler and Pressure Vessel Codes).
3. **American Society for Testing and Materials (ASTM)**. Esta sociedad genera las especificaciones para la mayor parte de los materiales utilizados de acuerdo con el Código para tuberías de ANSI, Piping Codes y para el Código de calderas y recipientes a presión de ASME, Boiler and Pressure Vessel Codes.
4. **International Organization for Standardization (ISO)**. Este organismo contribuye a la generación de normas en todo el mundo. Cuenta con 80 naciones afiliadas.

ALEACIONES Y METALES FERROSOS

Acero El acero al carbono es el más común, barato y aplicable de los metales que se emplean en la industria. Tiene una ductibilidad excelente, lo que permite que se utilice en muchas operaciones de formado en frío. El acero también se puede soldar con facilidad.

Los grados de acero que se emplean comúnmente en las industrias de procesos químicos tienen una resistencia a la tracción dentro del nivel de 345 a 485 MPa (50 000 a 70 000 lbf/in^2) con buena ductibilidad. Es posible alcanzar niveles de resistencia todavía más altos con trabajado en frío, con aleaciones y con tratamiento térmico.

El acero al carbono es, con mucho, el material de empleo más común en las plantas de proceso, a pesar de que presenta una resistencia a la corrosión limitada en cierto grado. Se utiliza de manera habitual con la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y con soluciones acuosas neutras o básicas a temperaturas moderadas. También se emplea con frecuencia para almacenar ácido sulfúrico y sosa cáustica concentrados [por encima de 50% y a 55°C (130°F)]. Debido a que es muy fácil de conseguir, de bajo costo y de fabricación sencilla, el acero se emplea con frecuencia, en servicios que presentan velocidades de corrosión de 0.13 a 0.5 mm/año (5 a 20 mils/año) con cierto espesor adicional (**tolerancia a la corrosión**) para asegurar la duración de servicio prevista. Los requerimientos de calidad de los productos se deben considerar cuidadosamente en tales casos.

Aceros de baja aleación Los aceros de baja aleación contienen uno o más agentes de aleación para mejorar las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión por encima de las del acero al carbono.

Un grado usual de aleación baja [American Iron and Steel Institute (AISI) 4340] contiene 0.40% de C, 0.70% de Mn, 1.85% de Ni, 0.80% de Cr y 0.25% de Mo. Se utilizan muchos otros agentes de aleación para producir un número grande de grados de productos con normas AISI.

El níquel aumenta la tenacidad y mejora las propiedades a bajas temperaturas y la resistencia a la corrosión. El cromo y el silicio mejoran la dureza, la resistencia a la abrasión, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la oxidación. El molibdeno proporciona resistencia a temperaturas elevadas.

La adición de cantidades pequeñas de materiales de aleación mejora considerablemente la resistencia de corrosión en los ambientes atmosféricos; pero no tienen mucho efecto contra los líquidos corrosivos. Los elementos de la aleación producen una película de herrumbre apretada, densa y adherente; pero en las soluciones ácidas o alcalinas, la corrosión es, más o menos, equivalente a la del acero al carbono. Sin embargo, la resistencia mayor permite paredes más delgadas en los equipos de procesamiento hechos de acero de baja aleación.

Hierros colados En general, el hierro colado no es un material estructural particularmente fuerte o resistente, aun cuando se trata de uno de los más económicos y se utiliza mucho en la industria.

El **hierro colado gris**, de costo bajo y fácil de vaciar en formas complejas, contiene carbono, silicio, manganeso y hierro. Se encuentra presente carbono, 1.7 a 4.5%, como carbono combinado y grafito; el carbono combinado se dispersa en la matriz como carburo de hierro (cementita), mientras que el grafito libre aparece como laminillas delgadas y dispersas por todo el cuerpo del metal. Se producen diversos grados de resistencia de hierro gris, que hacen variar el tamaño, la cantidad y la distribución del grafito.

El hierro gris tiene propiedades "amortiguadoras" sobresalientes —o sea, capacidad para absorber la vibración—, además de gran resistencia al desgaste; sin embargo, el hierro gris es frágil y tiene baja resistencia a los choques y a los impactos. Su facilidad para el maquinado es excelente.

Los vaciados de hierro colado gris, con algunas excepciones importantes, suelen tener una resistencia a la corrosión similar a la que posee el acero al carbono. Estos vaciados resisten la corrosión atmosférica, así como también los ataques de suelos neutros y aguas naturales o neutras. Sin embargo, este material es atacado por las soluciones de ácido-sal y los ácidos diluidos.

El hierro gris es resistente a los ácidos concentrados (nítrico, sulfúrico, fosfórico), así como también a algunas soluciones alcalinas y cáusticas. Los crisoles de fusión cáustica se hacen, por lo común, de hierro colado gris con bajo contenido de silicio; las válvulas, las bombas y las tuberías de hierro colado son comunes en las plantas de ácido sulfúrico.

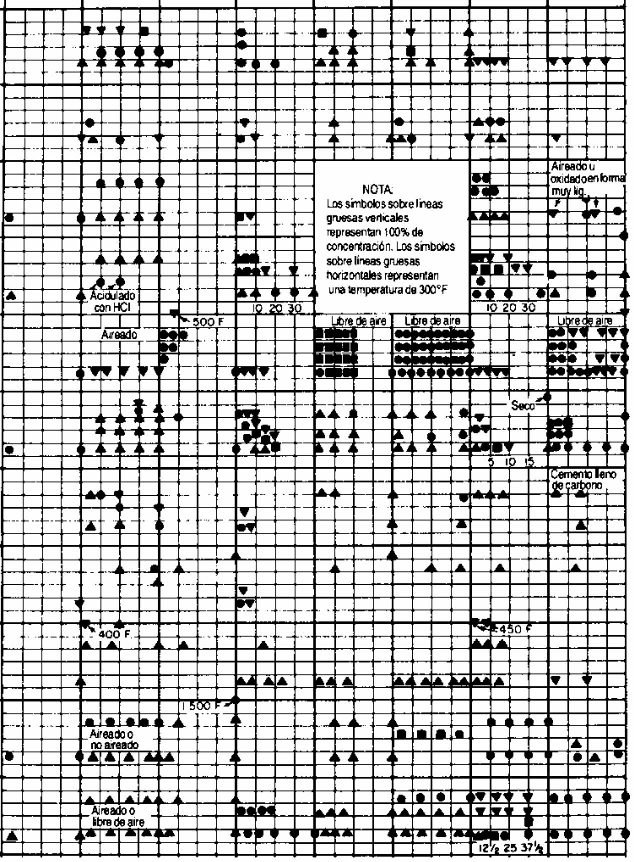
El **hierro colado blando** es frágil y difícil de maquinar. Se hace mediante el control de la composición y el índice de solidificación del hierro fundido, para que todo el carbono se encuentre presente en la forma combinada. Muy resistente a la abrasión y el desgaste, el hierro colado blanco se emplea para recubrimientos y para hélices de bombas, dados y bolas de molinos.

El **hierro maleable** se hace con hierro colado blanco. Es hierro colado con carbono libre en forma de nódulos dispersos. Esta configuración produce un material duro y relativamente dúctil. El carbono total es de, aproximadamente, 2.5%. Se produce en dos tipos: estándar y perlítico (carbono combinado más nódulos). El hierro maleable estándar se puede maquinar con facilidad, pero no tanto el perlítico. Los dos tipos soportan las flexiones y el trabajo en frío sin fracturarse. Las zonas soldadas grandes no se recomiendan con soldadura de fusión, debido a que las soldaduras son frágiles. La resistencia a la corrosión es aproximadamente la misma que la del hierro colado gris.

El **hierro colado dúctil** incluye un grupo de materiales con buena resistencia, dureza, resistencia al desgaste y capacidad o facilidad para el maquinado. Este tipo de hierro colado contiene carbono combinado

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción *

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS (Temperatura, °F: 0, 100, 200, 300; Concentración, %: 0, 50, 100)	Anhídrido acético	Ácido acético	Ácido bórico	Ácido crómico	Ácido cítrico	Ácido fórmico	Ácido clorhídrico	Ácido fluorhídrico
Aluminio ▲ = < 0.005 in al año; ● = 0.005–0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Resinas asfálticas ▲ = Satisfactorio; ● = Satisfactorio para uso limitado; ▼ = No satisfactorio								
Chlorimet 2 ▲ = < 0.002 in al año; ● = 0.002–0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Chlorimet 3 ▲ = < 0.002 in al año; ● = 0.002–0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Cobre, bronce de aluminio, bronce de estaño ▲ = < 0.002 in al año; ● = < 0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Aleación 20 ▲ = < 0.002 in al año; ● = 0.002–0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Resinas epóxicas ▲ = Satisfactorio; ● = Satisfactorio para uso limitado; ▼ = No satisfactorio								
Resinas de furano ▲ = Satisfactorio; ● = Satisfactorio para uso limitado; ▼ = No satisfactorio								
Vidrio ▲ = < 0.005 in al año; ● = 0.005–0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Hastelloy B-2 ▲ = < 0.002 in al año; ● = < 0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								
Hastelloy C-276 ▲ = < 0.002 in al año; ● = < 0.02 in al año; ■ = 0.02–0.05 in al año; ▼ = > 0.05 in al año								



* Basada en información publicada en la revista *Chemical Engineering*. Esas gráficas sirven para estrechar la gama de opciones para la selección. No se deben utilizar para ninguna otra cosa. Es preciso tomar en cuenta los efectos de los contaminantes, la aireación, el acoplamiento galvánico, la erosión, etc. Las pruebas sobre el terreno son mejores para determinar si los materiales son adecuados. Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2

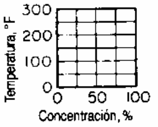
CLAVE

Hierro colado; Hierro con alto co[…]; Plomo; Metal Monel; Neopreno; Níquel; Resinas fenólic[…]; Poliésteres; Polietileno; Cloruro de poli[…]; Caucho (natura[…]); Caucho butilo

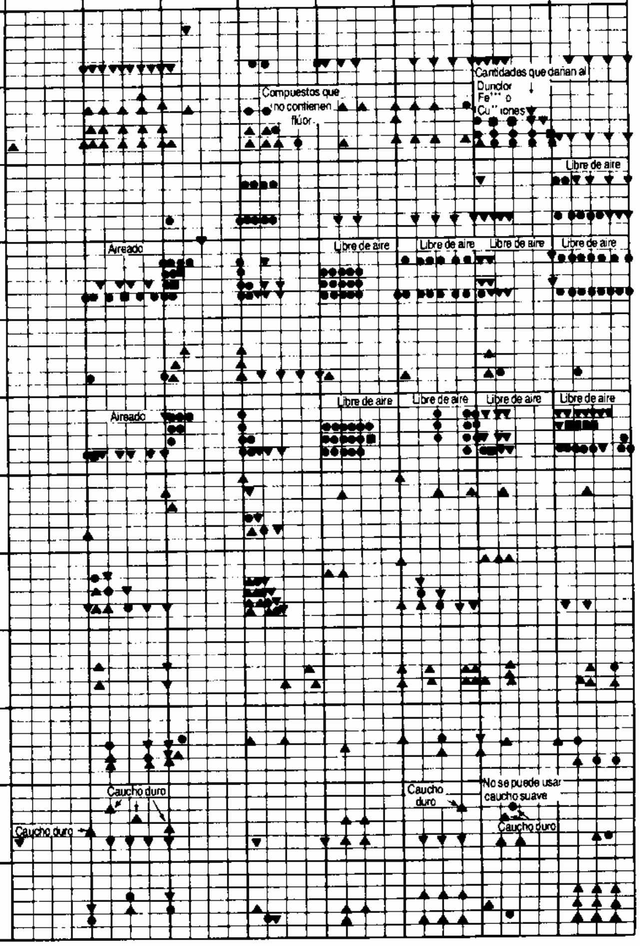
* Para conver[…]

TABLA 23-2 **Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción*** *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



Material	Anhídrido acético	Ácido acético	Ácido bórico	Ácido crómico	Ácido cítrico	Ácido fórmico	Ácido clorhídrico	Ácido fluorhídrico
Hierro colado ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Hierro con alto contenido de silicio ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Plomo ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Metal Monel ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Neopreno ▲ = Satisfactorio ● = Sólo para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Níquel ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Resinas fenólicas ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Poliésteres ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Polietileno ▲ = Resistencia completa ● = Algunos ataques ▼ = Ataques o descomposición								
Cloruro de polivinilo, no plastificado ▲ = Resistencia completa ● = Algunos ataques ▼ = Ataques o descomposición								
Caucho (natural, GR-S) ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente no satisfactorio								
Caucho butilo ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente no satisfactorio								



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

Ácido fluorhídrico

Aireado u oxidado en forma muy lig.

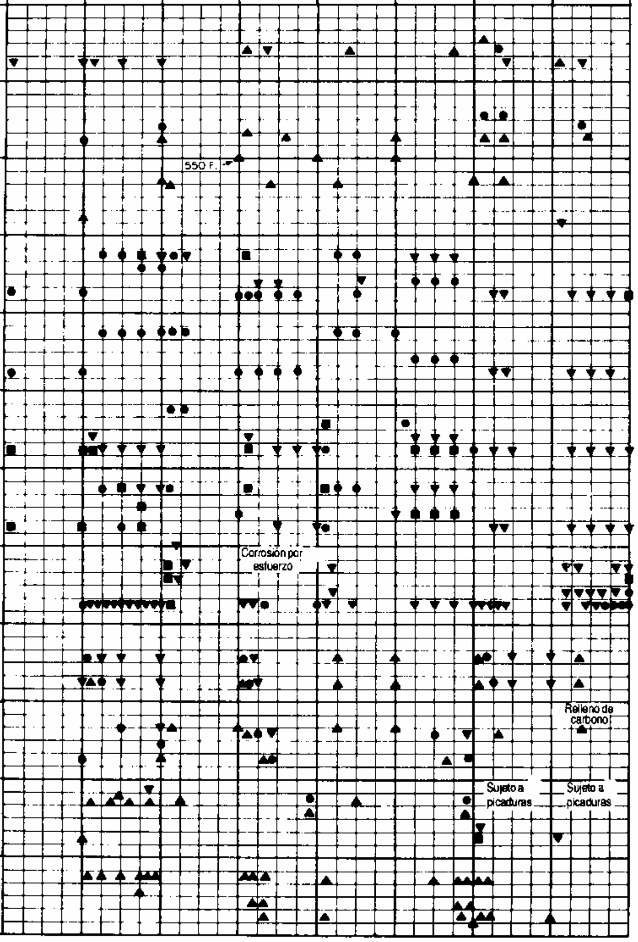
Libre de aire

Cemento lleno de carbono

...ción. No se deben utilizar ...s pruebas sobre el terreno

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS Temperatura, °F: 0, 100, 200, 300 Concentración, %: 0, 50, 100	Anhídrido acético	Ácido acético	Ácido bórico	Ácido crómico	Ácido cítrico	Ácido fórmico	Ácido clorhídrico	Ácido fluorhídrico
Caucho nitrilo ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente satisfactorio								
Sarán ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Cementos de silicatos * ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio * Relleno de sílice de fraguado químico								
Acero inoxidable, 18-8 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02 0.05 in al año ▼ > 0.05 in al año								
Acero inoxidable tipo 316 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero inoxidable 12% de cromo ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero inoxidable, 17% de cromo ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Copolímeros de estireno de alto impacto ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Cementos de azufre ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Worthite ▲ = < 0.005 in al año ● = 0.005–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Circonio ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								



*Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

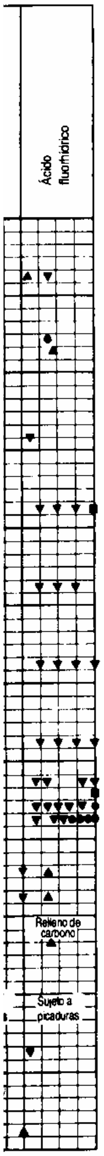
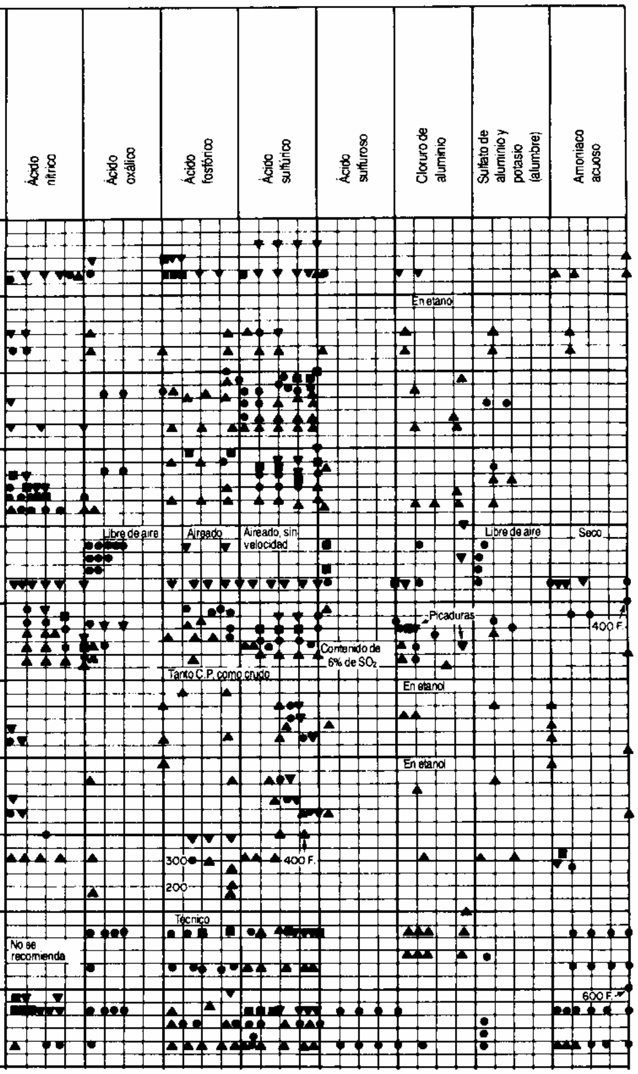


TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS

Temperatura, °F: 0, 100, 200, 300

Concentración, %: 0, 50, 100



Aluminio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas asfálticas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Chlorimet 2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Chlorimet 3
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.03 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Cobre, bronce de aluminio, bronce de estaño
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Aleación 20
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas epóxicas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Resinas de furano
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Vidrio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

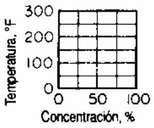
Hastelloy B-2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Hastelloy C-276
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

*Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



Columnas: Ácido nítrico | Ácido oxálico | Ácido fosfórico | Ácido sulfúrico | Ácido sulfuroso | Cloruro de aluminio | Sulfato de aluminio y potasio (alumbre) | Amoníaco acuoso

Hierro colado
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Hierro con alto contenido de silicio
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.0020.02 in al año
- ■ = 0.02-0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Plomo
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Metal Monel
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Neopreno
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Níquel
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas fenólicas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

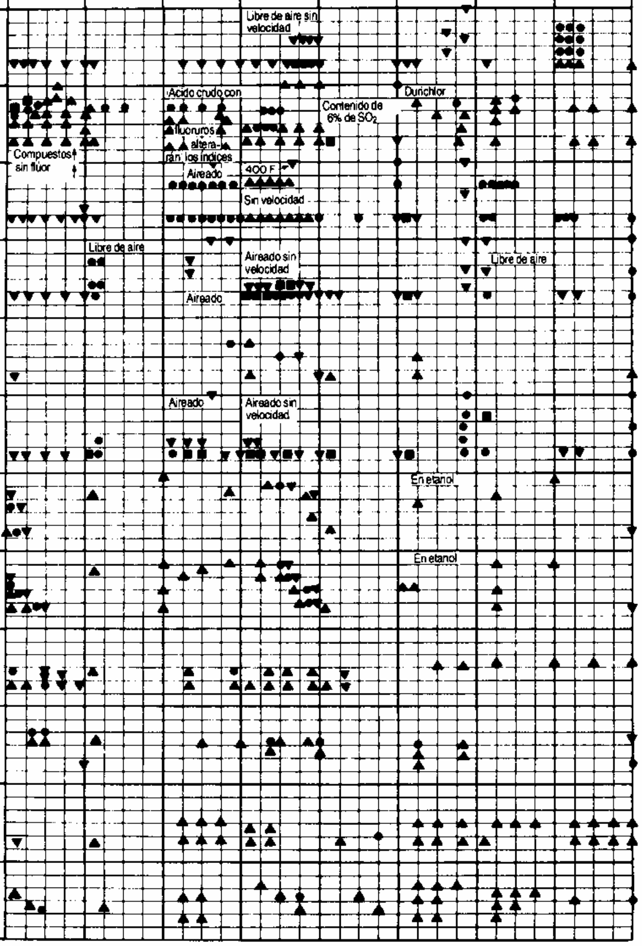
Poliéster
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Polietileno
- ▲ = Resistencia completa
- ● = Algunos ataques
- ▼ = Ataques o descomposición

Cloruro de polivinilo no plastificado
- ▲ = Resistencia completa
- ● = Algunos ataques
- ▼ = Ataques o descomposición

Caucho (natural, GR-S)
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = Generalmente no satisfactorio

Caucho butilo
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = Generalmente no satisfactorio



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2

CLAVE

Temperatura, °F 300 200 10

Caucho nitrilo ▲ = Satisfa ● = Satisfa ▼ = Gener

Sarán ▲ = Satisfa ● = Satisfa ▼ = No se

Cementos de sil ▲ = Satisf ● = Satisf ▼ = No sat * Relleno de sil

Acero inoxidabl ▲ = < 0.002 ● = < 0.02 ■ = 0.02- ▼ = > 0.05

Acero inoxidabl ▲ = < 0.002 ● = < 0.02 ■ = 0.02- ▼ = > 0.05

Acero inoxidabl ▲ = < 0.002 ● = < 0.02 ■ = 0.02- ▼ = > 0.05

Acero inoxidabl ▲ = < 0.002 ● = < 0.02 ■ = 0.02- ▼ = > 0.05

Acero ▲ = < 0.002 ● = < 0.02 ■ = 0.02- ▼ = > 0.05

Copolímeros d ▲ = Satis ● = Satis ▼ = No s

Cementos de s ▲ = Sati ● = Sati ▼ = No s

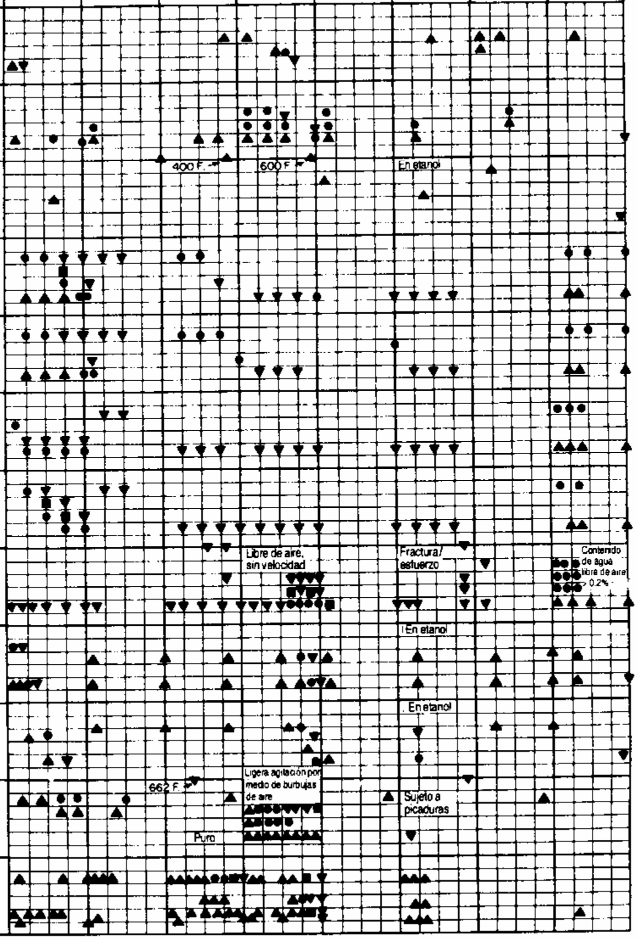
Worthite ▲ = < 0.00 ● = 0.00 ■ = 0.02 ▼ = > 0.05

Circonio ▲ = < 0.00 ● = 0.00 ■ = 0.02 ▼ = > 0.05

* Para conver

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*

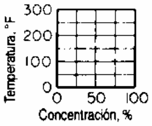
CLAVE PARA LAS GRÁFICAS Temperatura, °F: 0, 100, 200, 300 Concentración, %: 0, 50, 100	Ácido nítrico	Ácido oxálico	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Ácido sulfuroso	Cloruro de aluminio	Sulfato de aluminio y potasio (alumbre)	Amoniaco acuoso
Caucho nitrilo ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente no satisfactorio								
Sarán ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No se recomienda								
Cementos de silicatos* ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio * Relleno de sílice, fraguado químico								
Acero inoxidable 18-8 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero inoxidable tipo 316 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero inoxidable 12% de Cr ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero inoxidable 17% Cr ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Acero ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Copolímeros de estireno, alto impacto ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Cementos de azufre ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Worthite ▲ = < 0.005 in al año ● = 0.005–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Circonio ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

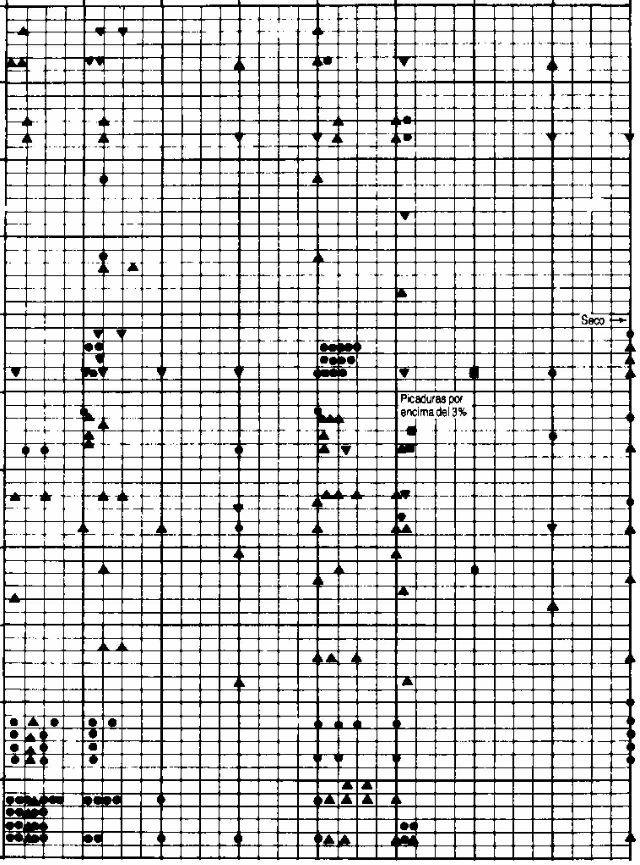
TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



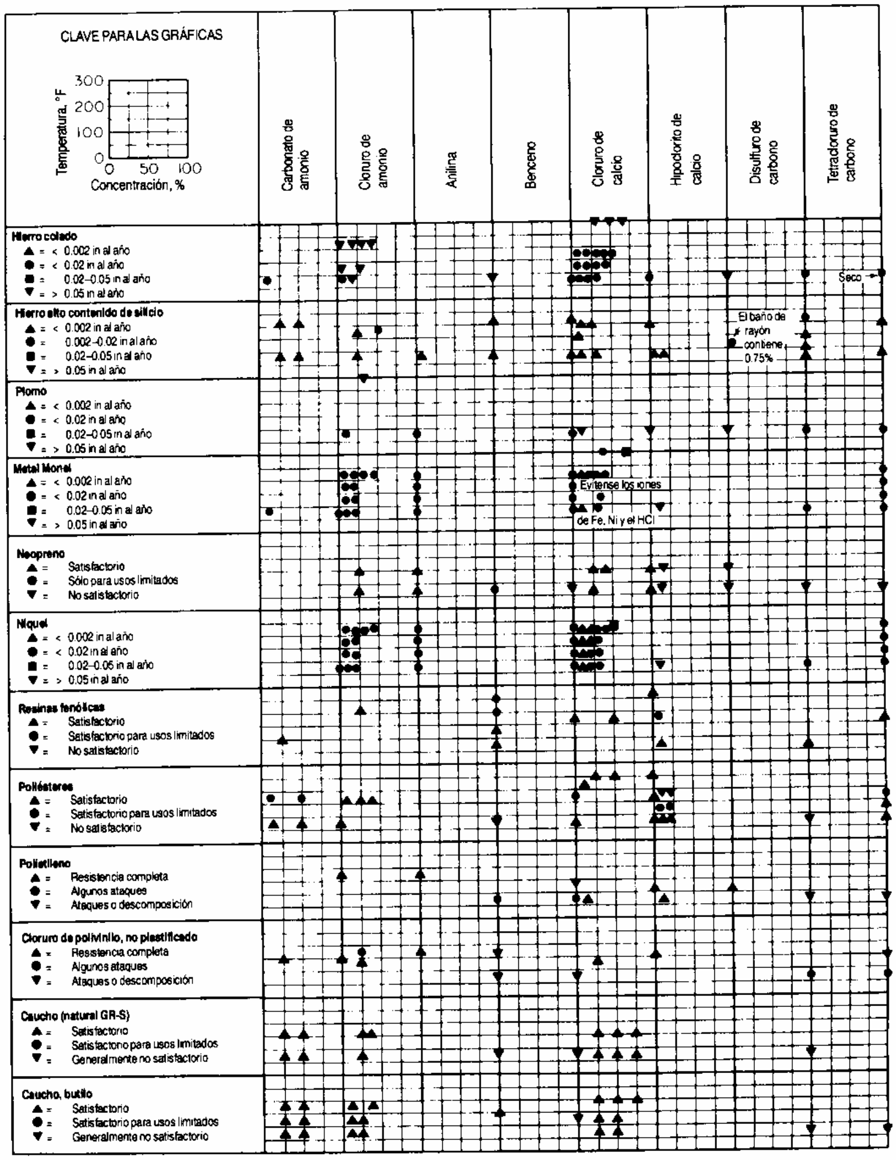
Columnas (de izquierda a derecha): Carbonato de amonio | Cloruro de amonio | Anilina | Benceno | Cloruro de calcio | Hipoclorito de calcio | Disulfuro de carbono | Tetracloruro de carbono

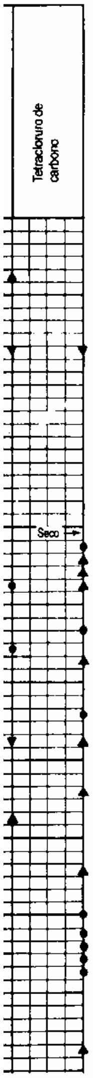
Material y clave	Carbonato de amonio	Cloruro de amonio	Anilina	Benceno	Cloruro de calcio	Hipoclorito de calcio	Disulfuro de carbono	Tetracloruro de carbono
Aluminio ▲ = < 0.005 in al año ● = 0.005–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Resinas asfálticas ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Chlorimet 2 ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Chlorimet 3 ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Cobre, bronce de aluminio, bronce de estaño ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Aleación 20 ▲ = < 0.002 in al año ● = 0.002–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Resinas epóxicas ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Resinas de furano ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio								
Vidrio ▲ = < 0.005 in al año ● = 0.005–0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Hastelloy B-2 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								
Hastelloy C-276 ▲ = < 0.002 in al año ● = < 0.02 in al año ■ = 0.02–0.05 in al año ▼ = > 0.05 in al año								



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

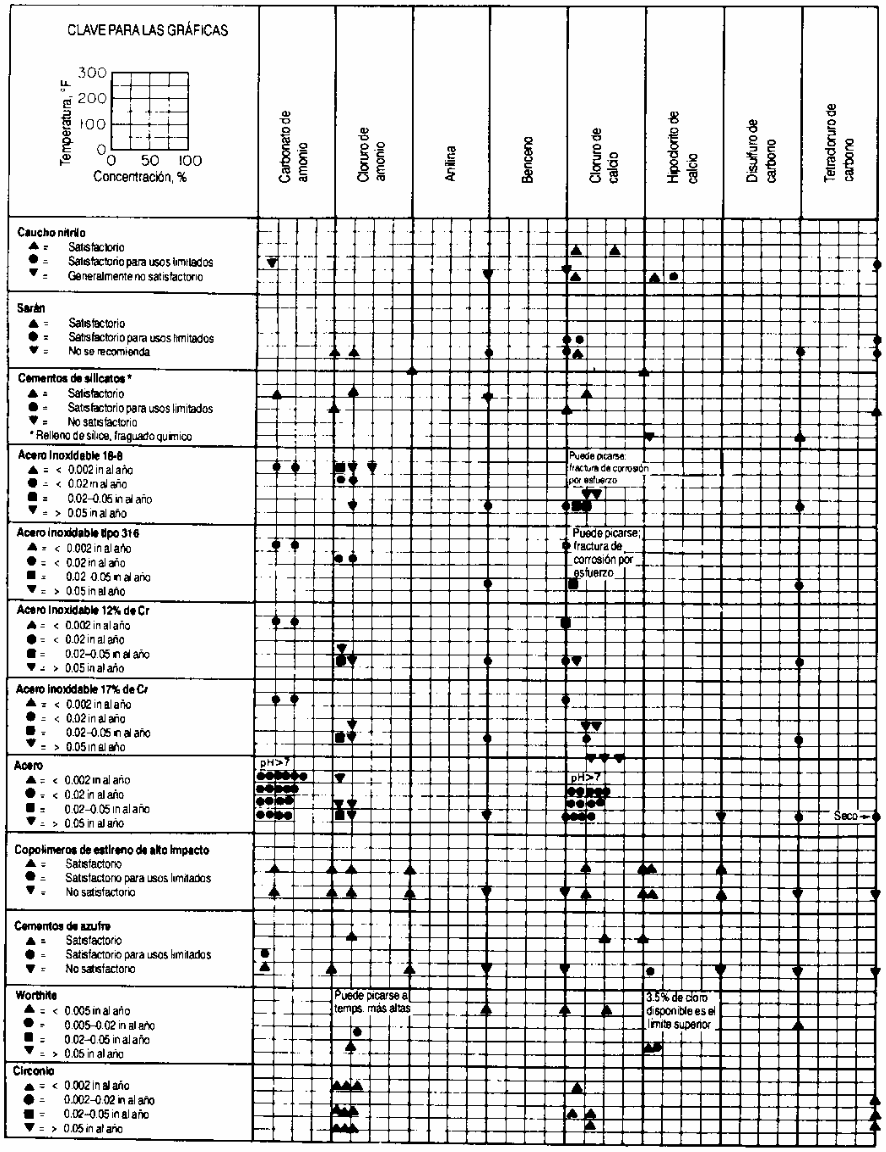
TABLA 23-2 **Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción*** *(Continúa)*





* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

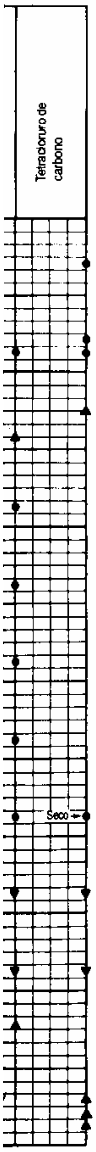
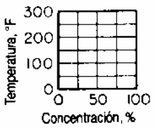


TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



Columnas: Sulfato de cobre · Etanol · Etilenglicol · Cloruro férrico · Cloruro ferroso · Ácidos grasos · Sulfato ferroso · Glicerina

Aluminio
▲ = < 0.005 in al año
● = 0.005–0.02 in al año
■ = 0.02 -0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Resinas asfálticas
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio

Chlorimet 2
▲ = < 0.002 in al año
● = 0.002–0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Chlorimet 3
▲ = < 0.002 in al año
● = 0.002–0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Cobre, bronce de aluminio, bronce de estaño
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Aleación 20
▲ = < 0.002 in al año
● = 0.002–0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

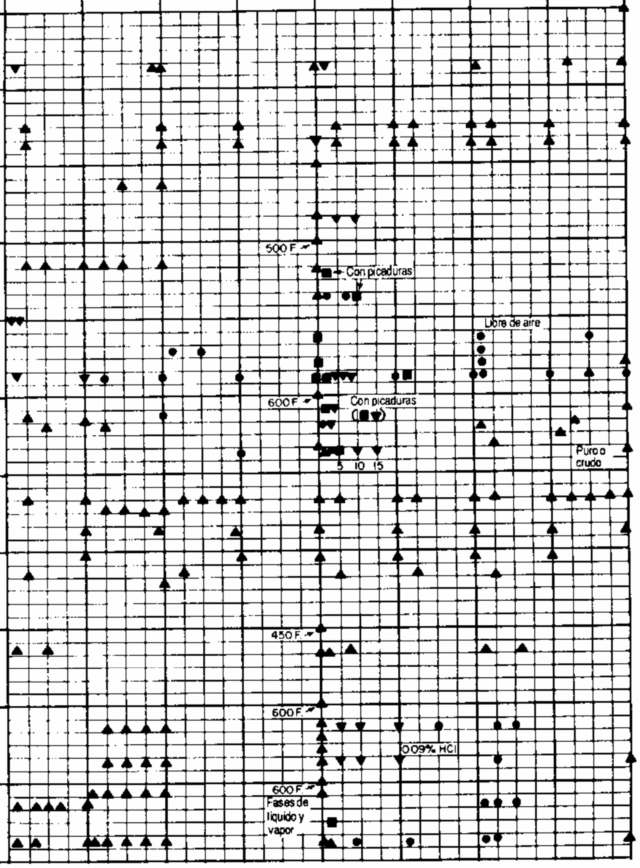
Resinas epóxicas
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio

Resinas de furano
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio

Vidrio
▲ = < 0.005 in al año
● = 0.005–0.02 in al año
■ = 0.02–0.06 in al año
▼ = > 0.05 in al año

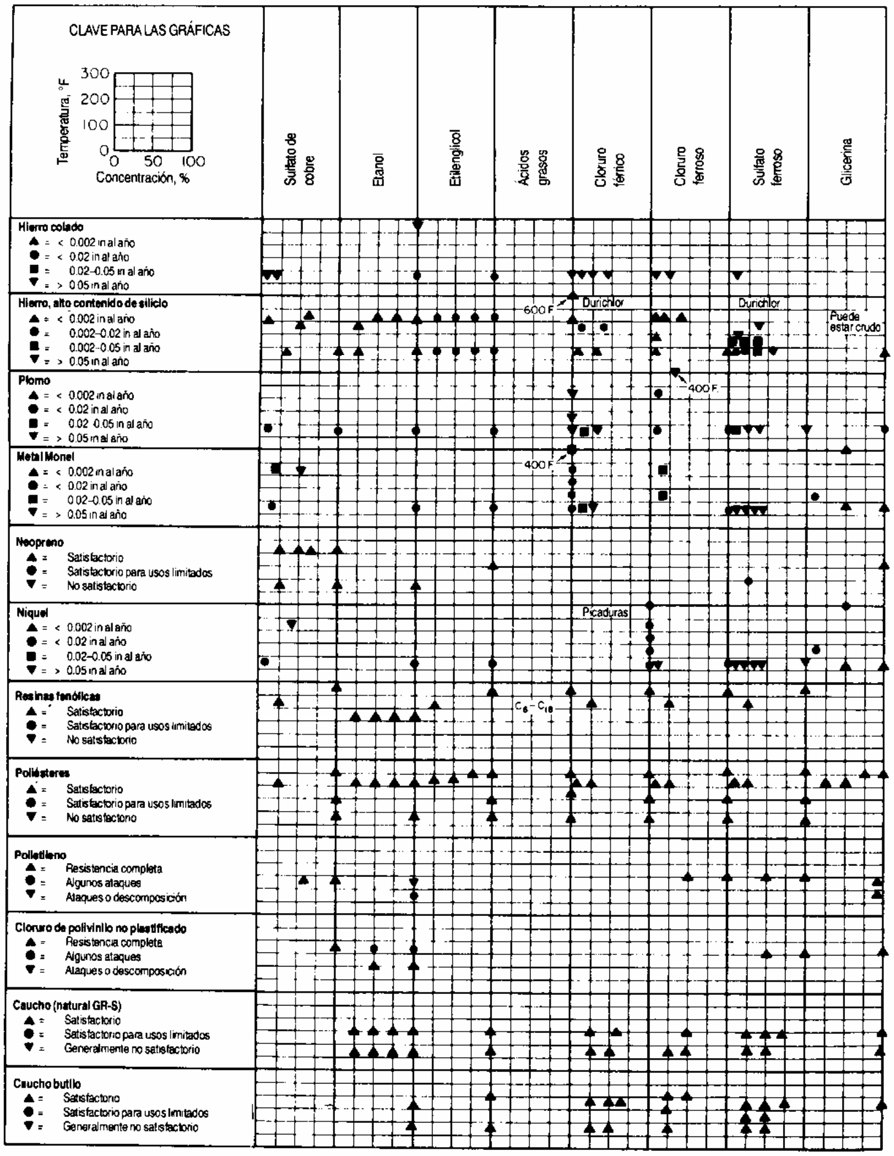
Hastelloy B-2
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Hastelloy C-276
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

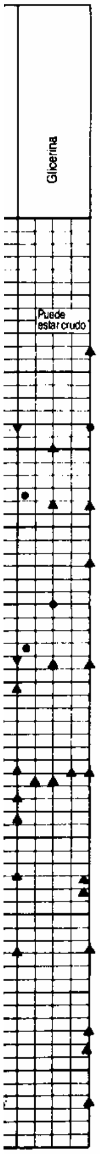
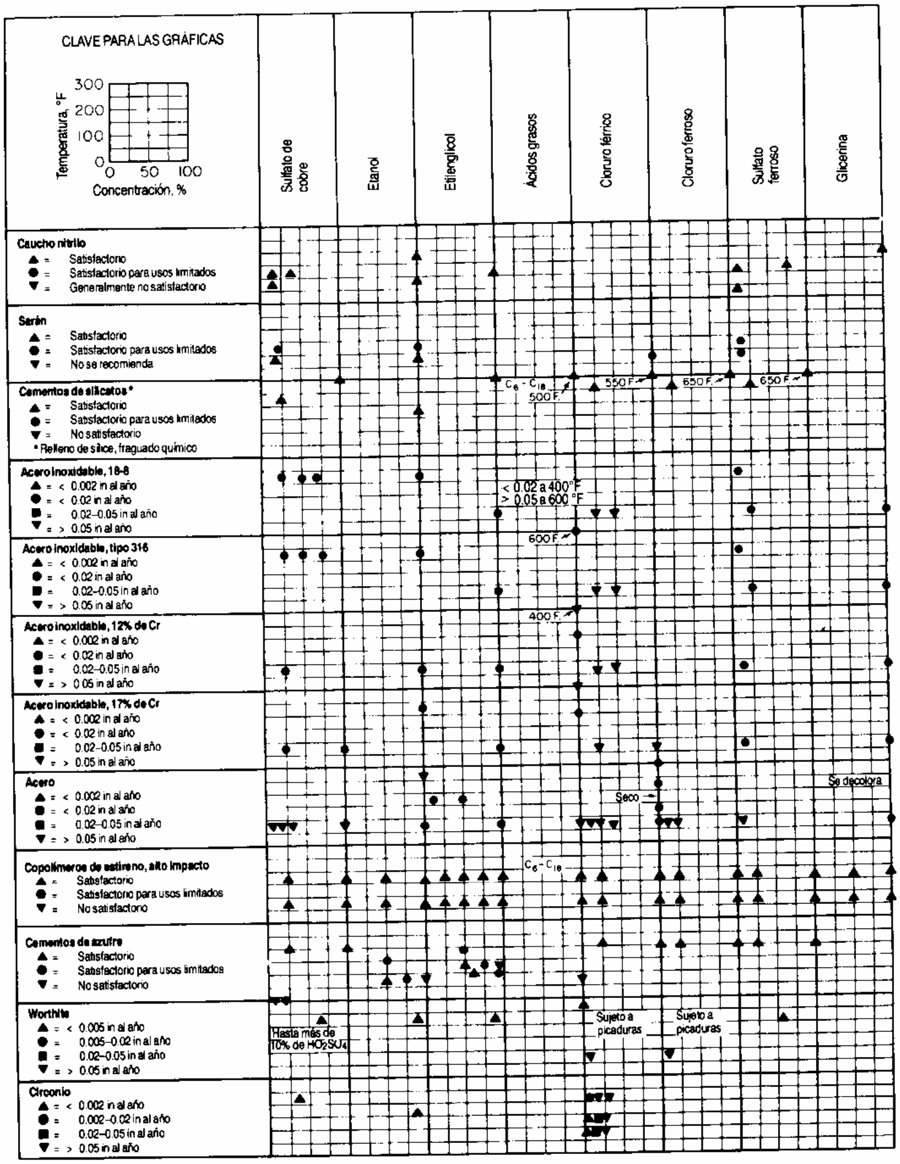


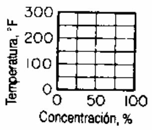
TABLA 23-2 **Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción*** *(Continúa)*



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



Columnas: Peróxido de hidrógeno | Cloruro de magnesio | Sulfato de magnesio | Metanol | Cloruro de níquel | Sulfato de níquel | Fenol | Hidróxido de potasio

Aluminio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas asfálticas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Chlorimet 2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Chlorimet 3
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Cobre, bronce de aluminio, bronce de estaño
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Aleación 20
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas epóxicas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

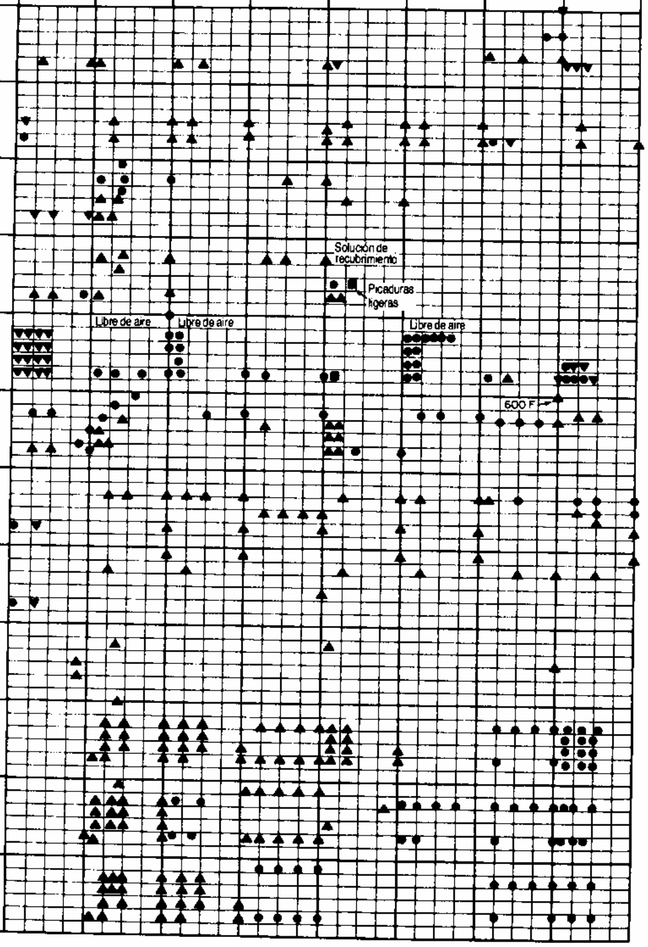
Resinas de furano
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Vidrio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Hastelloy B-2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

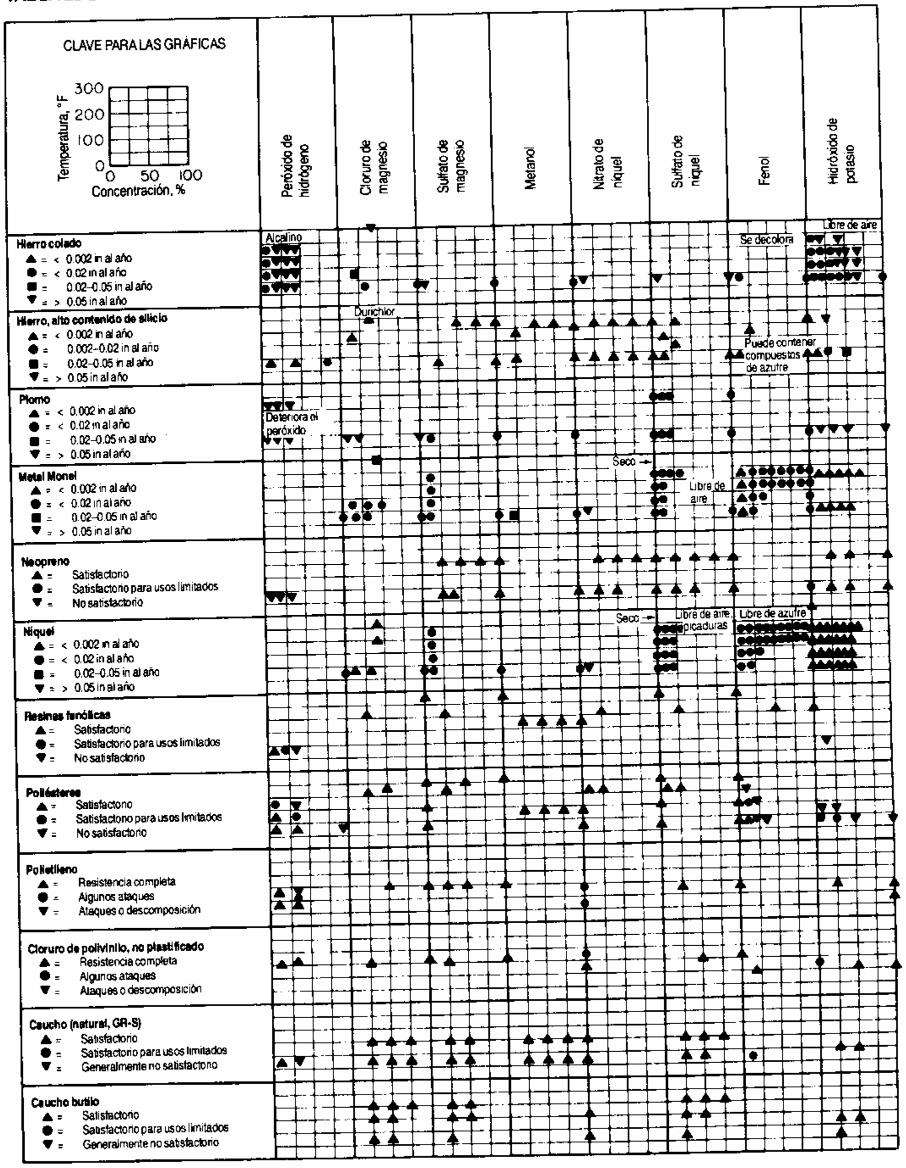
Hastelloy C-276
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Hastelloy D
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

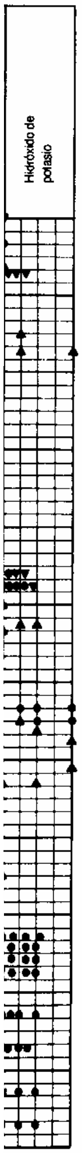
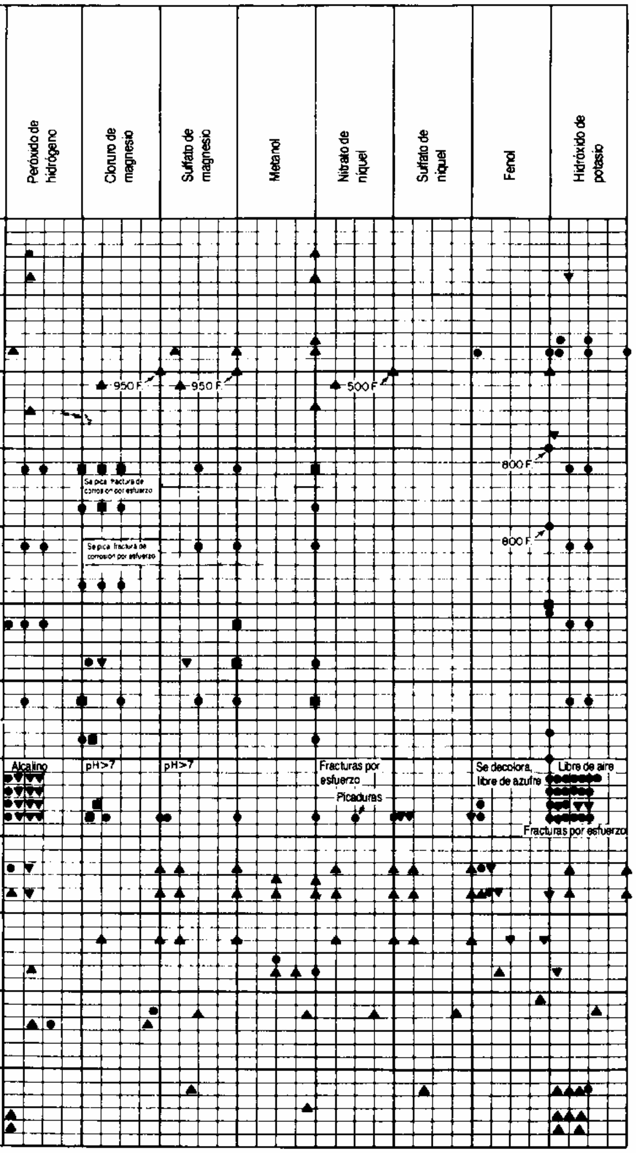


TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción * *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS

Temperatura, °F: 0, 100, 200, 300

Concentración, %: 0, 50, 100



Caucho nitrilo
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = Generalmente no satisfactorio

Sarán
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No se recomienda

Cementos de silicatos *
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio
- * Relleno de sílice, fraguado químico

Acero inoxidable, 18-8
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable, tipo 316
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable, de 12% de Cr
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable, 17% de Cr
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Acero
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Copolímeros de estireno, alto impacto
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Cementos de azufre
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Worthite
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Circonio
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

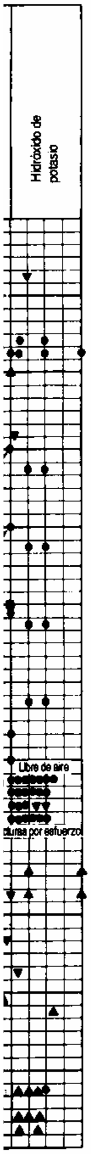
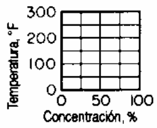


TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS	Permanganato de potasio	Sulfato de potasio	Carbonato de sodio	Cloruro de sodio	Hidróxido de sodio	Nitrato de sodio	Cloruro de zinc	Sulfato de zinc



Aluminio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Resinas asfálticas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Chlorimet 2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in el año

Chlorimet 3
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in el año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Cobre, bronce de alum. bronce de estaño
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

Aleación 20
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = 0.002–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

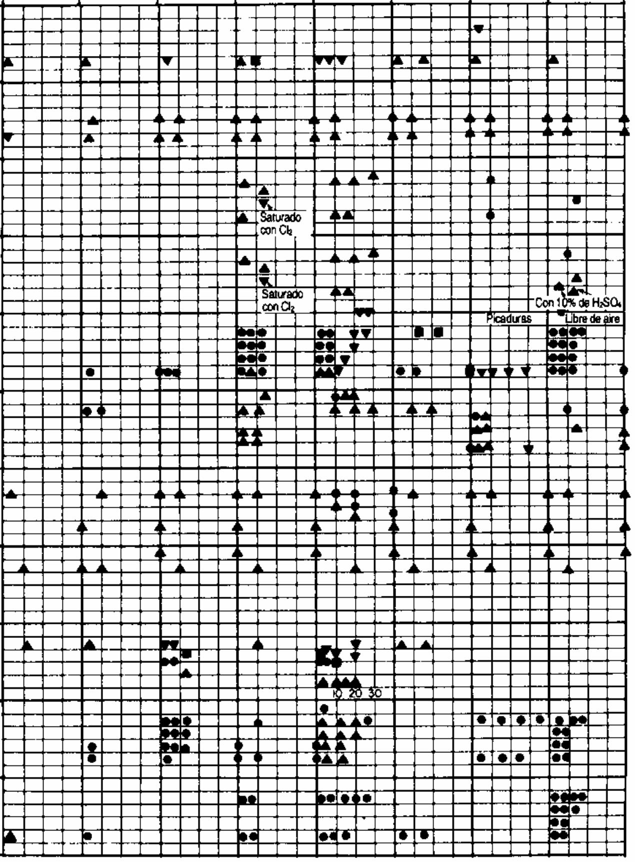
Resinas epóxicas
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Resinas de furano
- ▲ = Satisfactorio
- ● = Satisfactorio para usos limitados
- ▼ = No satisfactorio

Vidrio
- ▲ = < 0.005 in al año
- ● = 0.005–0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año

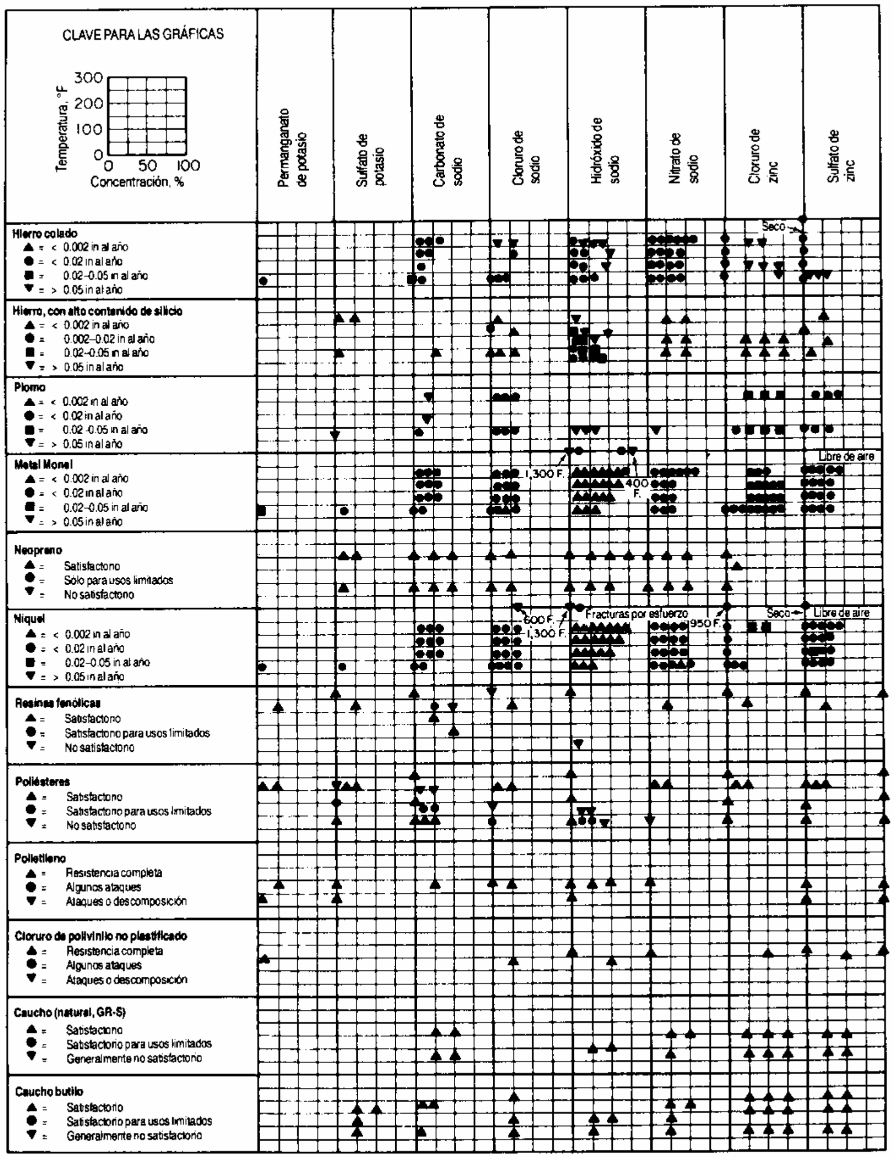
Hastelloy B-2
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in el año
- ▼ = > 0.05 in al año

Hastelloy C-276
- ▲ = < 0.002 in al año
- ● = < 0.02 in al año
- ■ = 0.02–0.05 in al año
- ▼ = > 0.05 in al año



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-2

CLAVE

Caucho nitrilo

Sarán

Cementos de sil

Acero inoxidabl

Acero inoxidabl

Acero inoxidabl

Acero inoxidabl

Acero

Copolímeros d

Cementos de s

Worthite

Circonio

* Para conver

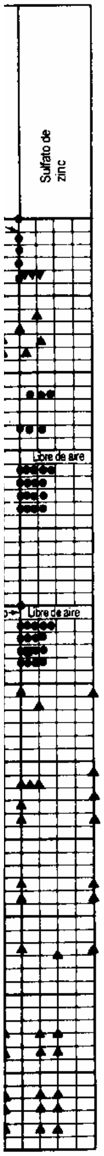
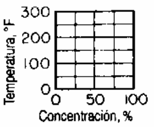


TABLA 23-2 Datos detallados de corrosión sobre materiales de construcción* *(Continúa)*

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS



Columnas: Permanganato de potasio | Sulfato de potasio | Carbonato de sodio | Cloruro de sodio | Hidróxido de sodio | Nitrato de sodio | Cloruro de zinc | Sulfato de zinc

Caucho nitrilo
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = Generalmente no satisfactorio

Sarán
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No se recomienda

Cementos de silicatos*
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio
*Relleno de sílice, fraguado químico

Acero inoxidable 18-8
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable tipo 316
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable, 12% de Cr
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Acero inoxidable, 17% de Cr
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

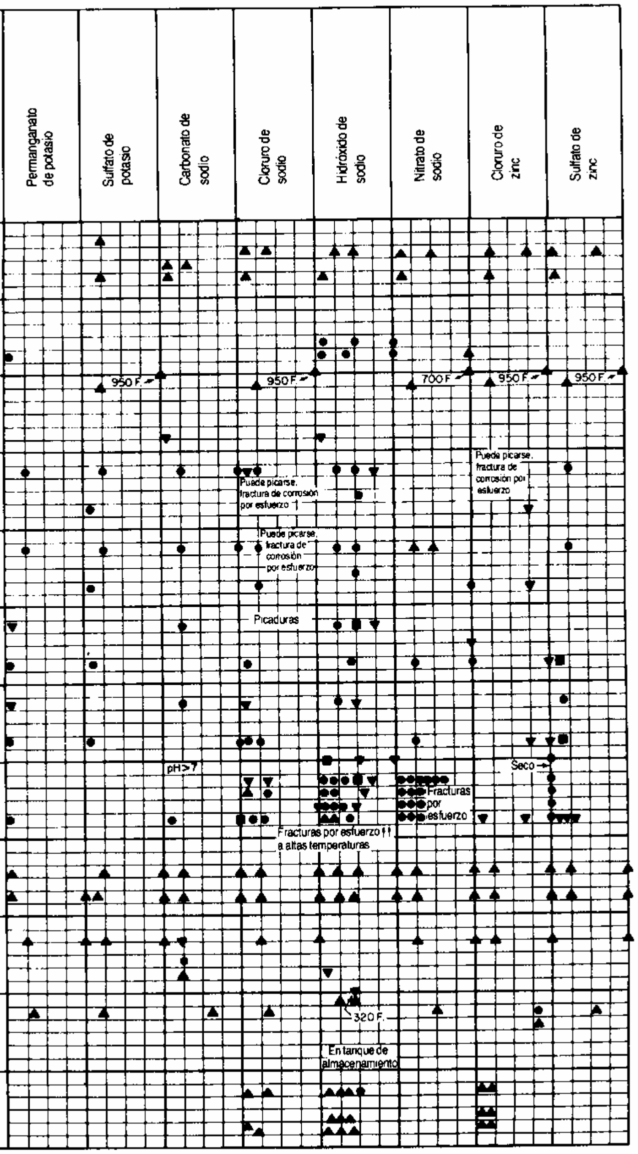
Acero
▲ = < 0.002 in al año
● = < 0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Copolímeros de estireno de alto impacto
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio

Cementos de azufre
▲ = Satisfactorio
● = Satisfactorio para usos limitados
▼ = No satisfactorio

Worthite
▲ = < 0.005 in al año
● = 0.005–0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año

Circonio
▲ = < 0.002 in al año
● = 0.002–0.02 in al año
■ = 0.02–0.05 in al año
▼ = > 0.05 in al año



* Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4.

TABLA 23-3 Propiedades generales de corrosión de algunos metales y diversas aleaciones *

Clasificaciones:
0: No apropiado. No disponible en la forma necesaria, no apropiado para los requisitos de fabricación o inadecuado para las condiciones de corrosión.
1: Malo a regular.
2: Regular. Para condiciones moderadas o cuando no sea posible la substitución periódica. Usos restringidos.
3: Regular a bueno.
4: Bueno. Apropiado, cuando las alternativas superiores no sean económicas.
5: Bueno a excelente.
6: Normalmente excelente.
Las variaciones pequeñas de las condiciones de servicio pueden afectar de modo apreciable la resistencia a la corrosión. Por consiguiente, la selección de materiales se basa, siempre que es posible, en una combinación de experiencia, análisis de laboratorio y pruebas sobre el terreno.

	Líquidos												Gases			
	Medios no oxidantes o reductores				Medios oxidantes			Aguas naturales				Medios industriales comunes				
			Soluciones alcalinas; por ejemplo:					Suministros de agua dulce		Agua de mar		Vapor		Gases de hornos, con contenido ocasional de azufre		
Material	Soluciones ácidas, excluyendo el clorhídrico, por ejemplo, fosfórico y sulfúrico, en la mayor parte de las condiciones, muchos compuestos orgánicos	Soluciones neutras; por ejemplo, muchas soluciones de sales no oxidantes, cloruros y sulfatos	Álcalis moderados y cáusticos, excluyendo el hidróxido de amonio	Hidróxido de amonio y aminas	Soluciones ácidas; por ejemplo, nítrico	Soluciones neutras o alcalinas; por ejemplo, persulfatos, peróxidos y cromatos	Medio de picadura,† soluciones de cloruro férrico ácido	Estática o con movimiento lento	Turbulenta	Estática o con movimiento lento	Turbulenta	Húmedo, condensado	Seco a altas temperaturas, fomenta una ligera disociación	Reductores; por ejemplo, gases de hornos de tratamiento térmico	Oxidantes; por ejemplo, gases de combustión	Aire ambiental, industrial o urbano
Hierro colado, grafito escamoso, aleación sencilla o baja	1	3	4	5	0	4	0	4	3	4	2	4	4	1	1	3
Hierro dúctil (es posible obtener más dureza y mayor resistencia mediante la composición, el tratamiento térmico o ambas cosas)	1	3	4	5	0	4	0	4	4	4	3	4	4	1	1	3
Ni-Resistente, hierro colado resistente a la corrosión	4	5	5	5	0	5	0	5	5	5	5	5	5	3	2	4
Hierro con 14% de silicio	6	6	2	5	6	6	3	5	5	5	5	6	4	4	3	6
Acero dulce, también aceros y hierros de baja aleación	1	3	4	5	0	4	0	4	3	4	2	4	4	1	1	3
Acero inoxidable tipo ferrítico 17% Cr	2	4	4	6	5	6	0	4	6	1	4	5	6	3	2	4
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0	6	6	2	5	6	6	2	3	5

Hierro con 14% de silicio	6	6	2	5	6	6	3	5	5	5	5	6	4	4	3	6
Acero dulce, también aceros y hierros de baja aleación	1	3	4	5	0	4	0	4	3	4	2	4	4	1	1	3
Acero inoxidable tipo ferrítico 17% Cr	2	4	4	6	5	6	0	4	6	1	4	5	6	3	2	4
Acero inoxidable tipo austenítico 18 Cr; 8 Ni	3	4	5	6	6	6	0	6	6	2	5	6	6	2	3	5
Acero inoxidable tipo austenítico 18 Cr; 12 Ni; 2.5 Mo	4	5	5	6	5	6	1	6	6	3	5	6	6	2	4	6
Acero inoxidable tipo austenítico 20 Cr; 29 Ni; 2.5 Mo; 3.5 Cu.	5	6	5	6	5	6	2	6	6	4	6	6	6	2	4	6
Incoloy 825, aleación de níquel-hierro-cromo (40 Ni; 21 Cr; 3 Mo; 1.5 Cu; el resto Fe)	6	6	5	6	5	6	2	6	6	4	6	6	6	2	5	6
Aleación Hastelloy C-276 (55 Ni; 17 Mo; 16 Cr; 6 Fe; 4 W)	5	6	5	6	4	6	5	6	6	6	6	6	6	3	4	6
Aleación Hastelloy B-2 (61 Ni; 28 Mo; 6 Fe)	6	5	4	4	0	3	0	6	6	4	4	6	5	3	2	5
Inconel 600 (78 Ni; 15 Cr; 7 Fe)	3	6	6	6	3	6	1	6	6	4	6	6	6	2	4	6

TABLA 23-3 Propiedades generales de corrosión de algunos metales y diversas aleaciones * (*Continuación*)

Clasificaciones:

0: No apropiado. No disponible en la forma necesaria, no apropiado para los requisitos de fabricación o inadecuado para las condiciones de corrosión.
1: Malo a regular.
2: Regular. Para condiciones moderadas o cuando sea posible la substitución periódica. Usos restringidos.
3: Regular a bueno.
4: Bueno. Apropiado, cuando las alternativas superiores no sean económicas.
5: Bueno a excelente.
6: Normalmente excelente.

Las variaciones pequeñas de las condiciones de servicio pueden afectar de modo apreciable la resistencia a la corrosión. Por consiguiente, la selección de materiales se basa, siempre que sea posible, en una combinación de experiencia y pruebas de laboratorio y pruebas sobre el terreno.

	Líquidos												Gases				
	Medios no oxidantes o reductores		Soluciones alcalinas: por ejemplo:		Medios oxidantes			Aguas naturales				Medios industriales comunes					
								Abastecimientos de agua dulce		Agua de mar		Vapor		Gases de hornos, con contenido ocasional de azufre			
Material	Soluciones ácidas, excluyendo el clorhídrico: por ejemplo, fosfórico sulfúrico, en la mayor parte de las condiciones, muchos compuestos orgánicos	Soluciones neutras: por ejemplo, muchas soluciones de sales no oxidantes, cloruros y sulfatos	Álcalis moderados y cáusticos, excluyendo el hidróxido de amonio	Hidróxido de amonio y aminas	Soluciones ácidas: por ejemplo, nítrico	Soluciones neutras o alcalinas: por ejemplo, persulfatos, peróxidos y cromatos	Medio de picadura,† soluciones de cloruro férrico ácido	Estática o con movimiento lento	Turbulenta	Estática o con movimiento lento	Turbulenta	Húmedo, condensado	Seco a altas temperaturas; fomenta una ligera disociación	Reductores: por ejemplo, gases de hornos de tratamiento térmico	Oxidantes: por ejemplo, gases de combustión	Aire ambiental, industrial o urbano
Aleación de cobre-níquel con hasta 30% de níquel	4	5	5	0	0	4	1	6	6	6	6	6	5	2	2	5
Aleación de níquel y cobre, Monel 400 (66 Ni; 30 Cu; 2 Fe)	5	6	6	1	0	5	1	6	6	4	6	6	6	2	3	5
Níquel 200 comercial (99.4 Ni)	4	5	6	1	0	5	0	6	6	3	5	6	6	2	2	4
Bronce de cobre y silicio	4	4	4	0	0	4	0	6	5	4	1	6	5	2	2	5
Latón de aluminio (76 Cu; 22 Zn; 2 Al)	3	4	2	0	0	3	0	6	6	4	5	6	5	2	2	5
Bronce de níquel-aluminio (80 Cu; 10 Al; 5 Ni; 5 Fe)	4	4	2	0	0	3	0	6	6	4	5	6	5	2	3	5
Bronce, tipo A (88 Cu; 5 Sn; 5 Ni; 2 Zn)	4	5	4	0	0	4	0	6	6	5	5	6	5	2	2	5
Aluminio y sus aleaciones	1	3	0	6	0-5	0-4	0	4	5	0-5	4	5	2	5	4	5
Plomo, químico o antimonial	5	5	2	2	0	2	0	6	5	5	3	2	0	4	3	5
Plata	4	6	6	0	0	2	0	6	6	5	5	6	5	4	4	4
Titanio	3	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	3	5	6
Circonio	3	6	2	6	6	6	2	6	6	6	6	6	6	3	5	6

	Gases (*Continuación*)						
	Halógenos y derivados						
	Halógenos						
	Húmedo; …	Seco; …	Ácidos de haluros, húmedos; por ejemplo …	Haluros de hidrógeno, secos; por …		Resistencia máxima	Coeficiente de dilatación …

Ni; 2 Zn)																
Aluminio y sus aleaciones	1	3	0	6	0-5	0-4	0	4	5	0-5	4	5	2	5	4	5
Plomo, químico o antimonial	5	5	2	2	0	2	0	6	5	5	3	2	0	4	3	5
Plata	4	6	6	0	0	2	0	6	6	5	5	6	5	4	4	4
Titanio	3	6	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	3	5	6
Circonio	3	6	2	6	6	6	2	6	6	6	6	6	6	3	5	6

Material	Gases (*Continuación*) — Halógenos y derivados — Halógenos: Húmedo: por ejemplo, cloro por debajo del punto de condensación	Halógenos: Seco: por ejemplo, flúor por encima del punto de condensación	Ácidos de haluros, húmedos: por ejemplo, clorhídrico productos de hidrólisis de haluros orgánicos	Haluros de hidrógeno, secos; por ejemplo, cloruro de hidrógeno seco, °F	Formas disponibles	Con formabilidad en frío, en forma forjada y con revestimiento	Soldabilidad	Resistencia máxima en la condición recocida × 1000 lb/in²	Coeficiente de dilatación térmica millonésimas por °F, 70-212 °F	Observaciones ¶
Hierro colado, grafito escamoso, aleación simple o baja	0	2	0	2 < 400 1 < 750	Vaciado	No	Regular §	45	6.7	
Hierro dúctil (es posible obtener más dureza y mayor resistencia mediante la composición, el tratamiento térmico o ambas cosas)	0	2	0	2 < 400 1 < 750	Vaciado	No	Bueno §	67	7.5	
Ni-resistente, hierro colado resistente a la corrosión	0	2	3	3 < 400 2 < 750	Vaciado	No	Bueno §	22-31	10.3	
Durión, hierro con 14% de silicio	0	0	4	1 < 400	Vaciado	No	No	22	7.4	Muy quebradizo, propenso a fracturarse al recibir choques mecánicos o térmicos
Acero dulce y también hierros de baja aleación	0	3	0	3 < 400 1 < 750	Forjado, vaciado	Bueno	Bueno	67	6.7	Se pueden obtener altas resistencias mediante aleaciones así como también mayor resistencia a la corrosión atmosférica. Véanse las especificaciones de ASTM para el grado de que se trate
Acero inoxidable, tipo ferrítico, 17% Cr	0	2	0	2 < 400	Forjado, vaciado y recubierto	Bueno	Bueno §	78	6.0	AISI tipo 430 ASTM aceros resistentes a la corrosión y al calor
Acero inoxidable, tipo austenítico, 18 Cr; 8 Ni	0	2	0	3 < 400	Forjado, vaciado y recubierto	Bueno	Bueno	90	9.6	AISI tipo 304 ASTM aceros resistentes a la corrosión y al calor. Para soldar se emplean tipos estabilizados o LC
Acero inoxidable, tipo austenítico, 18 Cr; 12 Ni; 2.5 Mo	0	3	2	4 < 400 3 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Bueno	Bueno	90	8.9	AISI tipo 316 ASTM aceros resistentes a la corrosión y al calor. Para soldar se utiliza el tipo LC
Acero inoxidable, tipo austenítico, 20 Cr; 29 Ni; 2.5 Mo; 3.5 Cu	1	3	3	4 < 400 3 < 750	Forjado, vaciado	Bueno	Bueno	90	9.4	ACI CH-7M Buena resistencia al sulfúrico, al fosfórico y a los ácidos grasos a temperaturas elevadas
Incoloy 825, aleación de níquel-hierro-cromo (40 Ni; 21 Cr; 3 Mo; 1.5 Cu; el resto Fe)	2	3	3	4 < 400 3 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Bueno	Bueno	100	7.3	Aleación especial con buena resistencia al sulfúrico, al fosfórico y a los ácidos grasos; resistente a cloruros en algunos ambientes
Aleación Hastelloy C-276 (55 Ni; 17 Mo; 16 Cr; 6 Fe; 4 W)	5	4	4	4 < 750 3 < 900	Forjado, vaciado y recubierto	Regular	Bueno	145	6.3	Resistencia excelente al gas de cloro húmedo y a las soluciones de hipoclorito de sodio
Aleación Hastelloy B-2 (61 Ni; 28 Mo; 6 Fe)	1	3	5	4 < 750 3 < 900	Forjado, vaciado y recubierto	Regular	Bueno	135	5.6	Resistente a las soluciones de ácido clorhídrico y sulfúrico
Inconel 600 (78 Ni; 15 Cr; 7 Fe)	2	5	3	5 < 400 4 < 900	Forjado, vaciado y recubierto	Bueno	Bueno	90	8.9	Se emplea mucho en la industria farmacéutica y en la de los alimentos.

TABLA 23-3 Propiedades generales de corrosión de algunos metales y diversas aleaciones * (*Conclusión*)

Clasificaciones:
0: No apropiado. No disponible en la forma necesaria, no apropiado para los requisitos de fabricación o inadecuado para las condiciones de corrosión.
1: Malo a regular.
2: Regular. Para condiciones moderadas o cuando sea posible la substitución periódica. Usos restringidos.
3: Regular a bueno.
4: Bueno. Apropiado, cuando las alternativas superiores no sean económicas.
5: Bueno a excelente.
6: Normalmente excelente.
Las variaciones pequeñas de las condiciones de servicio pueden afectar de modo apreciable la resistencia a la corrosión. Por consiguiente, la selección de materiales se basa, siempre que sea posible, en una combinación de experiencia y pruebas de laboratorio y pruebas sobre el terreno.

	Gases (*Continuación*)									
	Halógenos y derivados									
	Halógenos		Acidos de haluros, húm.; por ejemplo, clorhídrico y productos de hidrólisis de haluros orgánicos	Haluros de hidrógeno, secos: por ejemplo, cloruro de hidrógeno seco, °F						
Material	Húm; por ejem., cloro por debajo del punto de condens.	Sec; por ejem., flúor por arriba del punto de condens.			Formas disponibles	Con formabilidad en frío, en forma forjada y con revestimiento	Soldabilidad	Resistencia máx. en la condición recocida × 1000 lb/in²	Coeficiente de dilatación térmica, millonésimas por °F, 70-212 °F	Observaciones ¶
Aleación de cobre-níquel con hasta 30% de níquel	1	5	2	4 < 400 3 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Buena	Buena	38-62	9.3-8.5	Los tipos de alto contenido de hierro son excelentes para resistir los efectos de las altas velocidades en tubos de condensadores
Aleación de níquel y cobre. Monel 400 (66 Ni; 30 Cu; 2 Fe)	2	6	3	6 < 400 3 < 750 2 < 900	Forjado, vaciado y recubierto	Buena	Buena	77	7.5	Muy utilizados para equipos limpiadores de metales con soluciones diluidas de ácido sulfúrico. También para ejes de hélices en lanchas de motor. Se debe tener cuidado para evitar los ataques del azufre durante la fabricación
Níquel 200 comercial (99.4 Ni)	2	6	2	6 < 400 5 < 750 4 < 900	Forjado, vaciado y recubierto	Buena	Buena	54	6.6	Muy utilizado para soluciones cáusticas calientes y muy concentradas. Se deben tomar precauciones para que no haya ataques del azufre durante la fabricación
Bronce de cobre y silicio	0	5	2	3 < 400 2 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Excelente	Regular	29	9.3-9.5	No adecuado para ácidos minerales concentrados y calientes ni para HF de alta velocidad
Latón de aluminio (76 Cu; 22 Zn; 2 Al)	0	4	2	2 < 400 3 < 400	Forjado, vaciado Forjado, vaciado	Buena Buena	Regular Regular	60 60-80	10.3 9.4	Puede desarrollar corrosión localizada en el agua de mar Una aplicación excelente es en las hélices marinas
Bronce de níquel-aluminio (80 Cu; 10 Al; 5 Ni; 5 Fe)	0	4	3	2 < 750						
Bronce, tipo A (88 Cu; 5 Sn; 5 Ni; 2 Zn)	0	4	3	3 < 400 2 < 750	Vaciado	No	§	45	11.0	Se pueden obtener resistencias elevadas por medio del tratamiento térmico. No es propenso a la deszincificación
Aluminio y sus aleaciones	0	6	0	3 < 400 1 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Buena	Buena	9-90	11.5-13.7	Amplitud de la corrosión dependiente del tipo y la concentración de iones ácidos. Se puede obtener una gama amplia de propiedades mecánicas mediante aleaciones y tratamiento térmico
Plomo, químico o antimonial	0	1	3	0	Forjado, vaciado y recubierto	Excelente	Buena	2	16.4-15.1	Para la mayor parte de las aplicaciones se prefiere el "plomo químico" de alta pureza
Plata	5	5	3	4 < 400 2 < 750	Forjado, vaciado y recubierto	Excelente	Buena	21	10.6	Se utiliza como recubrimiento
Titanio	6	0	1	0	Forjado, vaciado	Regular	Buena §	6-90	5.0	El HNO_3, rojo fumante, puede iniciar explosiones.
Circonio	6	1	6	0	Forjado, vaciado	Regular	Buena §			Buena resistencia a las soluciones que contienen cloruros

* Datos por cortesía de International Nickel Co.
‡ En los materiales inadecuados, esos medios pueden fomentar picaduras potencialmente peligrosas
‡ Las temperaturas son aproximadas
§ Se requieren precauciones especiales
¶ Muchos de esos materiales resisten la corrosión en seco, a altas temperaturas.

TABLA 23-4 Sistema unificado para numerar aleaciones [Unified Alloy Numbering System (UNS)]

El UNS fue establecido en 1974 por la ASTM y la SAE para reducir la confusión derivada del etiquetado de las aleaciones comerciales. Los metales se colocan en 15 grupos, a cada uno de los cuales se le ha asignado un código de letras. La aleación específica se identifica con un número de cinco dígitos después de la letra asignada por el código.

Metales no ferrosos y sus aleaciones	
A00001–A99999	Aluminio y aleaciones de aluminio
C00001–C99999	Cobre y aleaciones de cobre
E00001–E99999	Tierras raras y metales parecidos a las tierras raras y sus aleaciones
L00001–L99999	Metales de baja fusión y sus aleaciones
M00001–M99999	Metales no ferrosos misceláneos y sus aleaciones
N00001–N99999	Níquel y aleaciones de níquel
P00001–P99999	Metales preciosos y sus aleaciones
R00001–R99999	Metales reactivos y refractarios y sus aleaciones
Metales ferrosos y sus aleaciones	
D00001–D99999	Aceros de propiedades mecánicas específicas
F00001–F99999	Aceros y hierros colados
G00001–G99999	Aceros al carbono AISI y SAE y sus aleaciones
H00001–H99999	Aceros H AISI
K00001–K99999	Aceros misceláneos y aleaciones ferrosas
S00001–S99999	Aceros (inoxidables) resistentes al calor y la corrosión
T00001–T99999	Aceros para herramientas

Cuando es posible, se han incorporado los sistemas de numerado de aleaciones de tres o cuatro dígitos que se utilizaron mucho inicialmente, como los desarrollados por Aluminum Asociation (AA), Copper Development Association (CDA), American Iron and Steel Institute (AISI), etc., con adición de la letra del código adecuada al grupo de aleación más los dígitos adicionales. Por ejemplo:

	Designación anterior		
Descripción de la aleación	Sistema	No.	Desginación UNS
Aluminio + 1.2% Mn	AA	3003	A93003
Cobre grado dúctil electrolítico	CDA	110	C11000
Acero al carbono, con 0.2% de Carbono	AISI	1020	G10200
Acero inoxidable 18 Cr, 8 Ni	AISI	304	S30400

A ciertas aleaciones se les han asignado números por AA, AISI, CDA, ASTM y SAE, que mantienen listas maestras en sus oficinas. Se pueden conseguir manuales que describen el sistema. (Consúltese la publicación DS-56AC de la ASTM.)

FUENTE: DS-56A ASTM. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

y nódulos dispersos de carbono. La composición es, aproximadamente, la misma que la del hierro gris, con más carbono que el hierro maleable (3.7%). El grafito esferoidal reduce el efecto de muescas que producen las laminillas de grafito, por lo cual el material es más dúctil.

Hay cierto número de grados de hierro dúctil; algunos tienen el máximo de resistencia y capacidad de maquinado, mientras que otros tienen una resistencia máxima a la oxidación.

En general, la resistencia a la corrosión es similar a la del hierro gris, pero el hierro dúctil se puede utilizar a temperaturas más altas, hasta 590°C (1100°F) y, a veces, todavía más elevadas.

Hierros colados de aleación El hierro colado no se considera por lo común resistente a la corrosión, pero esta característica se puede mejorar mediante la utilización de diversas aleaciones de hierro colado. Varios de esos materiales existen en el comercio.

TABLA 23-5 Coeficiente de expansión térmica de las aleaciones comunes*

Aleación	UNS	10^{-6} in/(in · °F)	10^{-6} mm/(mm · °C)	Gama de temperatura, °C
Aleación de aluminio AA1100	A91100	13.1	24.	20–100
Aleación de aluminio AA5052	A95052	13.2	24.	20–100
Aleación 43 de aluminio colado	A24430	12.3	22.	20–100
Cobre	C11000	9.4	16.9	20–100
Latón rojo	C23000	10.4	18.7	20–300
Latón Admiralty	C44300	11.2	20.	20–300
Metal Muntz	C28000	11.6	21.	20–300
Bronce de aluminio D	C61400	9.0	16.2	20–300
Aleación de cobre con estaño, plomo y zinc	C83600	10.2	18.4	0–100
Cobre níquel 90-10	C70600	9.5	17.1	20–300
Cobre níquel 70-30	C71500	9.0	16.2	20–300
Acero al carbono, AISI 1020	G10200	6.7	12.1	0–100
Hierro colado gris	F10006	6.7	12.1	0–100
Acero 4-6 Cr, $^1/_2$ Mo	S50100	7.3	13.1	20–540
Acero inoxidable, AISI 410	S41000	6.1	11.0	0–100
Acero inoxidable, AISI 446	S44600	5.8	16.4	0–100
Acero inoxidable, AISI 304	S30400	9.6	17.3	0–100
Acero inoxidable, AISI 310	S31000	8.0	14.4	0–100
Acero inoxidable, ACI HK	J94224	9.4	16.9	20–540
Aleación de níquel 200	N02200	7.4	13.3	20–90
Aleación de níquel 400	N04400	7.7	13.9	20–90
Aleación de níquel 600	N06600	7.4	13.3	20–90
Aleación de níquel-molibdeno B-2	N10665	5.6	10.1	20–90
Aleación de níquel-molibdeno C-276	N10276	6.3	11.3	20–90
Titanio de pureza comercial	R50250	4.8	8.6	0–100
Aleación de titanio TI-6AI-4V	R56400	4.9	8.8	0–100
Aleación de magnesio AZ31B	M11311	14.5	26.	20–100
Aleación de magnesio AZ91C	M11914	14.5	26.	20–100
Plomo químico	......	16.4	30.	0–100
Soldadura de plomo y estaño 50-50	L05500	13.1	24.	0–100
Zinc	Z13001	18.	32.	0–100
Estaño	L13002	12.8	23.	0–100
Circonio	R60702	2.9	5.2	0–100
Molibdeno	R03600	2.7	4.9	20–100
Tantalio	R05200	3.6	6.5	20–100

* *Con autorización de National Association of Corrosion Engineers.*

* Datos por cortesía de International Nickel Co.
† En los materiales inadecuados, esos medios pueden fomentar picaduras potencialmente peligrosas
‡ Las temperaturas son aproximadas
§ Se requieren precauciones especiales
¶ Muchos de esos materiales resisten la corrosión en seco, a altas temperaturas.

TABLA 23-6 Temperaturas de fusión de las aleaciones más comunes*

	UNS	Gama de fusión °F	Gama de fusión °C
Aleación de aluminio AA1100	A91100	1190–1215	640–660
Aleación de aluminio AA5052	A95052	1125–1200	610–650
Aleación 43 de aluminio colado	A24430	1065–1170	570–630
Cobre	C11000	1980	1083
Latón rojo	C23000	1810–1880	990–1025
Latón Admiralty	C44300	1650–1720	900–935
Metal Muntz	C28000	1650–1660	900–905
Bronce de aluminio D	C61400	1910–1940	1045–1060
Aleación de cobre con estaño, plomo y zinc	C83600	1510–1840	854–1010
Bronce de manganeso	C86500	1585–1616	862–880
Cobre níquel 90-10	C70600	2010–2100	1100–1150
Cobre níquel 70-30	C71500	2140–2260	1170–1240
Acero al carbono, AISI 1020	G10200	2760	1520
Hierro colado gris	F10006	2100–2200	1150–1200
Acero 4-6 Cr, ½ Mo	S50100	2700–2800	1480–1540
Acero inoxidable, AISI 410	S41000	2700–2790	1480–1530
Acero inoxidable, AISI 446	S44600	2600–2750	1430–1510
Acero inoxidable, AISI 340	S30400	2550–2650	1400–1450
Acero inoxidable, AISI 310	S31000	2500–2650	1400–1450
Acero inoxidable, ACI HK	J94224	2550	1400
Aleación de níquel 200	N02200	2615–2635	1440–1450
Aleación de níquel 400	N04400	2370–2460	1300–1350
Aleación de níquel 600	N06600	2470–2575	1350–1410
Aleación de níquel-molibdeno B-2	N10665	2375–2495	1300–1370
Aleación de níquel-molibdeno C-276	N10276	2420–2500	1320–1370
Titanio de pureza comercial	R50250	3100	1705
Aleación de titanio Tl-6Al-4V	R56400	2920–3020	1600–1660
Aleación de magnesio AZ 31B	M11311	1120–1170	605–632
Aleación de magnesio HK 31A	M13310	1092–1204	589–651
Plomo químico	......	618	326
Soldadura de plomo y estaño 50-50	L05500	361–421	183–216
Zinc	Z13001	787	420
Estaño	Z13002	450	232
Circonio	R60702	3380	186
Molibdeno	R03600	4730	2610
Tantalio	R05200	5425	2996

* *Con autorización de National Association of Corrosion Engineers.*

Los **hierros colados con alto contenido de silicio** tienen una resistencia excelente a la corrosión. El contenido de silicio es de 13 a 16%. Este material es conocido como Durion. La adición de 4% de Cr da un producto denominado Durichlor, que presenta resistencia mejorada contra agentes oxidantes. Estas aleaciones no se maquinan ni sueldan fácilmente.

Los hierros de silicio son muy resistentes a los ambientes oxidantes y reductores y la resistencia depende de la formación de una película pasiva. Esos hierros se utilizan ampliamente en los servicios con ácido sulfúrico, puesto que no se ven afectados por este ácido en todas las concentraciones, ni siquiera en el punto de ebullición.

Puesto que son muy duros, los hierros al silicio son buenos para servicios que combinan la corrosión con la erosión.

Otro grupo de aleaciones de hierro colado se denomina **Ni-Resist**. Estos materiales son parecidos al hierro colado gris, porque tienen contenidos elevados de carbono (3%), con laminillas finas de grafito distribuidas por toda la estructura. El contenido de níquel varía de 13.5 a 36%, y algunos tienen un 6.5% de Cu.

En general, las piezas vaciadas de aleación de níquel tienen una tenacidad superior y una gran resistencia a los impactos, en comparación con los hierros grises. Las piezas vaciadas de aleación de níquel se pueden soldar y labrar a máquina.

La **resistencia a la corrosión** de las aleaciones de níquel es superior a la de los hierros colados; pero inferior a la del níquel puro. Las soluciones neutras o alcalinas las atacan poco. Con ellas se puede manejar ácido sulfúrico concentrado frío.

El Ni-Resist tiene una resistencia térmica excelente y algunos de sus grados se pueden utilizar hasta 800°C (1500°F). Asimismo, existe una variedad dúctil y otra dura (Ni-Hard).

Acero inoxidable Hay más de 70 tipos estándares de acero inoxidable y muchas aleaciones especiales. Esos aceros se producen en la forma forjada (tipos AISI) y como aleaciones coladas [Alloy Casting Institute (tipos ACI)]. En general, todos tienen como base al hierro, con 12 a 30% de cromo, 0 a 22% de níquel, y cantidades menores de carbono, niobio (columbio), cobre, molibdeno, selenio, tantalio y titanio. Esas aleaciones son muy populares en las industrias de procesamiento. Son resistentes al calor y a la corrosión, no contaminantes y de fabricación sencilla, aun en formas complejas.

Hay tres grupos de aleaciones inoxidables: **1)** martensítica, **2)** ferrítica y **3)** austenítica.

Las **aleaciones martensíticas** contienen de 12 a 20% de cromo con cantidades controladas de carbono y otros aditivos. El tipo 410 es un miembro característico de este grupo. Esas aleaciones se pueden endurecer mediante el tratamiento térmico, con un aumento en la resistencia a la tracción de 550 a 1380 MPa (80 000 a 200 000 lbf/in^2).

La resistencia a la corrosión es inferior a la de los aceros inoxidables austeníticos y los aceros martensíticos se utilizan en general en ambientes ligeramente corrosivos (atmosférico, agua dulce y materiales orgánicos).

Los **aceros inoxidables ferríticos** contienen de 15 a 30% de Cr con un bajo contenido de carbono (0.1%). El contenido más alto de cromo mejora su resistencia a la corrosión. El tipo 430 es un ejemplo usual. La resistencia de los aceros inoxidables ferríticos se puede incrementar mediante el trabajado en frío, pero no por tratamiento térmico. Los grados ferríticos bastante dúctiles se pueden fabricar por todos los métodos estándares. Son bastante fáciles de labrar a máquina. La soldadura no constituye un problema, aun cuando requiere operarios especializados.

La resistencia a la corrosión se considera buena, aun cuando las aleaciones ferríticas no son buenas contra ácidos reductores, como el HCl, pero las soluciones medianamente corrosivas y los medios oxidantes se manejan sin daños. El tipo 430 se utiliza ampliamente en plantas de ácido nítrico. Además, es muy resistente a la escamación y la oxidación a altas temperaturas hasta 800°C (1500°F).

Los **aceros inoxidables austeníticos** son los más resistentes a la corrosión entre los tres grupos. Esos aceros contienen de 16 a 26% de cromo y 6 a 22% de níquel. El contenido de carbono se mantiene bajo (0.08% máximo) para minimizar la precipitación de carburos. Esas aleaciones se pueden endurecer por trabajo, pero el tratamiento térmico no causa endurecimiento. La resistencia a la tracción en la condición templada es de, aproximadamente, 585 MPa (85 000 lbf/in^2); pero el endurecimiento por trabajo puede incrementar esta cifra a 2000 MPa (300 000 lbf/in^2). Los aceros inoxidables austeníticos son duros y dúctiles.

TABLA 23-7 A

Tipo de acero	
C-Mn	A53
C-Mn	A10
C	A28
HSLA	A51
HSLA	A24
2 ¼ Cr, 1Mo	A38
4-6Cr, ½Mo	A3
9Cr, 1Mo	A3
9Ni	A3
	AIS
	AIS

* Cortesía de Nat
a Los valores solo
b Propiedades a la
c Clase 1.
d Clase 2.
e Barras de una p
f Barras de una p

Se pueden fabri grados austenítico trabajo y se raspa das, cortes pesado realizan con facili precipitación del c y reduce su resiste cos, sobre todo el carburo por medio evitar la precipitac les estabilizados Otro método para bajo contenido de nido máximo de c

Mediante la adi 316, 316L, 317 y a las picaduras.

En el grupo inox tencia a la corrosi mo. Aun así, los 18-8, funcionan n tencia depende de ción. Las condici película y provoc mación de picadu esfuerzos de tracc por esfuerzo.

Las aleaciones válvulas y acceso sistema de Alloy tentes a la corrosi el contenido crec máximo de carbo mada entre los tip

TABLA 23-7 Aceros al carbono y de baja aleación *

Tipo de acero	ASTM	UNS	Composición en %[a]	Propiedades mecánicas[b]: Resistencia a la cedencia, kip/in² (MPa)	Propiedades mecánicas[b]: Resistencia a la tracción, kip/in² (MPa)	Elongación, %
C-Mn	A53B	K03005	0.30 C, 1.20 Mn	35 (241)	60 (415)	
C-Mn	A106B	K03006	0.30 C, 0.29-1.06 Mn, 0.10 como mínimo Si	35 (241)	60 (415)	30
C	A285A	K01700	0.17 C, 0.90 Mn	24 (165)	45-55 (310-380)	30
HSLA	A517F	K11576	0.08-0.22 C, 0.55-1.05 Mn, 0.13-0.37 Si, 0.36-0.79 Cr, 0.67-1.03 Ni, 0.36-0.64 Mo, 0.002-0.006 B, 0.12-0.53 Cu, 0.02-0.09 V	100 (689)	115-135 (795-930)	16
HSLA	A242(1)	K11510	0.15 C, 1.00 Mn, 0.20 mínimo Cu, 0.15 P	42-50 (290-345)	63-70 (435-480)	21
2 ¹/₄ Cr, 1Mo	A387(22)	K21590	0.15 C, 0.30-0.60 Mn, 0.5 Si, 2.00-2.50 Cr, 0.90-1.10 Mo	30 (205)[c] 45 (310)[d]	60-85 (415-585)[c] 75-100 (515-690)[d]	18[c] 18[d]
4-6Cr, ¹/₂Mo	A335 (P5)	K41545	0.15 C, 0.30-0.60 Mn, 0.5 Si, 4.00-600 Cr, 0.45-0.65 Mo	30 (205)	60 (415)	
9Cr, 1Mo	A335 (P9)	K81590	0.15 C, 0.30-0.6 Mn, 0.25-1.00 Si, 8.00-10.00 Cr, 0.90-1.10 Mo	30 (205)	60 (415)	
9Ni	A333(8), A353(1)	K81340	0.13 C, 0.90 Mn, 0.13-0.32 Si, 8.40-9.60 Ni	75 (515)	100-120 (690-825)	20
	AISI 4130	G41300	0.28-0.33 C, 0.80-1.10 Mn, 0.15-0.3 Si, 0.8-1.10 Cr, 0.15-0.25 Mo	120 (830)[e]	140 (965)[e]	22[e]
	AISI 4340	G43400	0.38-0.43 C, 0.60-0.80 Mn, 0.15-0.3 Si, 0.70-0.90 Cr, 1.65-2.00 Ni, 0.20-0.30 Mo	125 (860)[f]	148 (1020)[f]	20[f]

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers*. Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
[a] Los valores solos son los valores máximos a menos que se diga otra cosa.
[b] Propiedades a la temperatura ambiente. Los valores solos son los mínimos.
[c] Clase 1.
[d] Clase 2.
[e] Barras de una pulgada de diámetro enfriadas con agua al estar a 860°C (1575°F) y templadas a 650°C (1200°F).
[f] Barras de una pulgada de diámetro, enfriadas con aceite al estar a 845°C (1550°F) y templadas a 650°C (1200°F).

Se pueden fabricar por cualquier método estándar; sin embargo, los grados austeníticos no son fáciles de maquinar; se endurecen por el trabajo y se raspan. Para su empleo son esenciales las máquinas rígidas, cortes pesados y altas velocidades; sin embargo, las soldaduras se realizan con facilidad, aunque el calor de soldadura puede causar la precipitación del carburo de cromo, que agota el cromo de la aleación y reduce su resistencia a la corrosión en algunos ambientes específicos, sobre todo el de ácido nítrico. Se puede evitar la precipitación del carburo por medio de tratamiento térmico (solución de recocido). Para evitar la precipitación, se han desarrollado aceros inoxidables especiales estabilizados con titanio, niobio o tantalio (tipos 321, 347, 348). Otro método para abordar este problema es el empleo de aceros con bajo contenido de carbono, como los tipos 304L y 316L, con un contenido máximo de carbono del 0.03%.

Mediante la adición de molibdeno a la aleación austenítica (tipos 316, 316L, 317 y 317L) se logra una resistencia mejor a la corrosión y a las picaduras.

En el grupo inoxidable, el níquel mejora considerablemente la resistencia a la corrosión por encima de la de los aceros inoxidables de cromo. Aun así, los aceros de cromo y níquel, sobre todo las aleaciones 18-8, funcionan mejor en **condiciones oxidantes**, puesto que la resistencia depende de la película de óxido sobre la superficie de la aleación. Las condiciones reductoras y los iones cloruro destruyen esta película y provocan un ataque rápido. Los iones cloruro causan la formación de picaduras y corrosión por grieta; cuando se combinan con esfuerzos de tracción elevados, pueden originar fractura de corrosión por esfuerzo.

Las **aleaciones inoxidables vaciadas** se utilizan mucho en bombas, válvulas y accesorios. Esas aleaciones vaciadas se designan según el sistema de Alloy Casting Institute (ACI). Todas las aleaciones resistentes a la corrosión tienen la letra C más otra letra (A a N) que denota el contenido creciente de níquel. Los números indican el contenido máximo de carbono. Aunque se puede hacer una comparación aproximada entre los tipos ACI y los AISI, las composiciones no son idénticas y los análisis no se pueden utilizar en forma intercambiable. Las técnicas de fundición requieren un rebalanceo de las composiciones químicas forjadas. Sin embargo, la resistencia a la corrosión no se ve afectada por esos cambios de composición. Los miembros característicos de este grupo son CF-8, similar al acero inoxidable tipo 304; CF-8M, similar al tipo 316 y CD-4M Cu, que tiene una resistencia mejorada al ácido nítrico, al sulfúrico y al fosfórico.

Además de los grados C, hay una serie de grados resistentes al calor de aleaciones vaciadas ACI, que se identifican por su similitud con los grados de resistencia a la corrosión, excepto que la primera letra es H en vez de C. Es preciso mencionar también los aceros inoxidables de endurecimiento por precipitación (PH), que se pueden endurecer por medio de tratamientos térmicos a temperaturas moderadas. Muy fuertes y duros a las temperaturas elevadas, estos aceros tienen sólo una resistencia moderada a la corrosión. Un acero PH usual que contiene 17% de Cr, 7% de Ni y 1.1% de Al tiene una resistencia elevada, buenas propiedades ante la fatiga y buena resistencia al desgaste y a la corrosión por cavitación. Un número elevado de estos aceros, con composiciones variables, se encuentran disponibles comercialmente. En forma esencial, contienen cromo y níquel con agentes agregados de aleación como cobre, aluminio, berilio, molibdeno, nitrógeno y fósforo.

Aleaciones medias Un grupo de aleaciones en su mayor parte patentadas, con una resistencia ligeramente mejor a la corrosión que la de los aceros inoxidables se denominan aleaciones medias. Uno de los miembros más populares de este grupo es la **aleación 20**, producida por ciertas compañías con diversos nombres comerciales. El Durimet 20 es una versión vaciada muy conocida que contiene 0.07% de C, 29% de Ni, 20% de Cr, 2% de Mo y 3% de Cu. La designación del ACI para esta aleación es CN-7M. Una forma forjada se conoce como Carpenter 20 (Cb3). La Worthite es otra aleación 20 con, aproximadamente, 24% de Ni y 20% de Cr. La aleación 20 se desarrolló originalmente para satisfacer la necesidad de un material con una resistencia al ácido sulfúrico superior a la de los aceros inoxidables.

TABLA 23-8 Propiedades de los aceros AISI de baja aleación

Propiedades físicas características[a]				
Tipo AISI	Temperatura de fusión, °F	Conductiv. térmica, Btu/(h)(ft²) (°F/ft);(212°F)	Coeficiente de dilatación térmica (0-1200°F) por °F	Calor específico (68-212°F) Btu/(lb · °F)
13XX	....	27	7.9×10^{-6b}	0.10-0.11
23XX	2600-2620	38.3[c]	8.0×10^{-6}	0.11-0.12
25XX	2610-2620	34.5-38.5[c]	7.8×10^{-6}	0.11-0.12
40XX	....	27	8.3×10^{-6b}	0.10-0.11
41XX	....	24.7[d]	....	0.11
43XX	2740-2750	21.7[c]	8.1×10^{-6}	0.107
46XX	....	27[d]	6.3×10^{-6e}	0.10-0.11
48XX	2750	26[f]	8.6×10^{-6}	
51XX	2720-2760	27-34[g]	7.4×10^{-6h}	0.10-0.11
61XX	....	27	8.1×10^{-6b}	0.10-0.11
86, 87XX	2745-2755	21.7[c]	8.2×10^{-6}	0.107
92, 94XX	....	27	8.1×10^{-6b}	0.10-0.12

XX = porcentaje nominal de carbono.
[a] La densidad para todos los aceros de baja aleación es de, aproximadamente, 0.28 lb/in³.
[b] 68 a 1200°F.
[c] 120°F.
[d] 68°F.
[e] 0 a 200°F.
[f] 75°F.
[g] 32 a 212°F.
[h] 100 a 518°F.

Otros miembros del grupo de aleaciones medias son **Incoloy 825** y **Hastelloy G-3**. El Incoloy 825 forjado tiene 40% de Ni, 21% de Cr, 3% de Mo y 2.25% de Cu. El Hastelloy G-3 contiene 44% de Ni, 22% de Cr, 6.5% de Mo y como máximo 0.05% de C.

Estas aleaciones tienen una aplicación muy amplia en los sistemas de ácido sulfúrico. Debido a su alto contenido de níquel y molibdeno tienen mayor tolerancia a la contaminación por el ion cloruro que los aceros inoxidables estándares. El contenido de níquel disminuye el riesgo de fractura debido a la corrosión por esfuerzo. El molibdeno mejora la resistencia a la corrosión por grieta y a las picaduras.

Aleaciones altas El grupo de materiales que se denominan aleaciones altas contienen porcentajes relativamente grandes de níquel. El **Hastelloy B-2** contiene 61% de Ni y 28% de Mo. Existen en la forma forjada y la vaciada. El endurecimiento por trabajo presenta ciertas dificultades de fabricación y el maquinado es un poco más difícil que para el acero inoxidable del tipo 316. Se pueden utilizar métodos tradicionales de soldadura. La aleación tiene una resistencia desacostumbradamente alta a todas las concentraciones de ácido clorhídrico, a todas las temperaturas en ausencia de agentes oxidantes. El ataque de ácido sulfúrico es bajo para todas las concentraciones a 65°C (150°F), pero el índice aumenta con la temperatura. Las sales y los ácidos oxidantes corroen con rapidez el Hastelloy B-2; pero los álcalis y las soluciones alcalinas provocan pocos daños en él.

El **Chlorimet 2** tiene 63% de Ni y 32% de Mo y se asemeja al Hastelloy B-2. Existe sólo en forma vaciada, principalmente en válvulas y bombas. Se trata de una aleación dura, muy resistente a los choques mecánicos y térmicos. Se puede labrar con herramientas de punta de carburo y soldar con técnicas de arco metálico.

La **Hastelloy C-276** es una aleación basada en el níquel que contiene cromo (15.5%), molibdeno (15.5%) y tungsteno (3%) como principales elementos de aleación. Sólo se puede conseguir en la forma forjada. Esta aleación es una modificación baja en impurezas del Hastelloy C, que se puede conseguir todavía en forma fundida. El bajo nivel de impurezas reduce sustancialmente el riesgo de la corrosión intergranular en la precipitación de las superficies límites de los granos en las zonas afectadas por el calor de la soldadura. Esta

TABLA 23-8 Propiedades de los aceros AISI de baja aleación (*Continúa*)

Propiedades mecánicas características[a]						
Tipo AISI	Resist. a la tracción, 1000 lbf/in²	Resist. a la cedencia (0.2% de desviación), 1000 lbf/in²	Elongación (en 2 in), %	Reducción del área, %	Dureza Brinell	Resistencia a los impactos (Izod), lbf · ft
1330[b]	122	100	19	52	248	
1335[c]	126	105	20	59	262	
1340[c]	137	118	19	55	285	
2317[c]	107	72	27	71	222	84
2515[c]	113	94	25	69	233	85
E2517[c]	120	100	22	66	244	80
4023[d]	120	85	20	53	255	
4032[c]	210	182	11	49	415	
4042[f]	235	210	10	42	461	
4053[g]	250	223	12	40	495	
4063[h]	269	231	8	15	534	
4130[i]	200	170	16	49	375	25
4140[f]	200	170	15	48	385	16
4150[k]	230	215	10	40	444	12
4320[d]	180	154	15	50	360	32
4337[k]	210	140	14	50	435	18
4340[k]	220	200	12	48	445	16
4615[d]	100	75	18	52	...	42
4620[d]	130	95	21	65	...	68
4640[l]	185	160	14	52	390	25
4815[d]	150	125	18	58	325	44
4817[d]	...	...	15	52	355	36
4820[l]	...	...	13	47	380	28
5120[d]	143	114	13	45	302	6
5130[m]	189	175	13	51	380	
5140[m]	190	170	13	43	375	16
5150[m]	224	208	10	40	444	
6120[n]	125	94	21	56	...	28
6145[o]	176	169	16	52	429	20
6145[o]	187	179	13	42	444	13
8620[p]	122	98	21	63	245	76
8630[p]	162	142	14	54	325	42
8640[p]	208	183	13	43	420	18
8650[p]	214	194	12	41	423	
8720[p]	122	98	21	63	245	76
8740[p]	208	183	13	43	420	18
8750[p]	214	194	12	41	423	
9255[p]	232[q]	215	9	21	477	6
9261[p]	258[r]	226	10	30	514	12

[a] Las propiedades corresponden a materiales endurecidos y templados como sigue: [b] enfriados por agua a partir de 1525°F, templado a 1000°F, [c] enfriado en aceite a partir de 1525°F, templado a 1000°F; [d] seudocarburizado 8 h a 1700°F, enfriado en aceite, templado 1 h a 300°F, [e] enfriado en agua partir de 1525°F, templado a 600°F; enfriado en aceite a partir de 1500°F, templado a 600°F; [g] enfriado en aceite a partir de 1475°F, templado a 600°F; [h] enfriado en aceite a partir de 1450°F, templado a 600°F; [i] enfriado en agua a partir de 1500 hasta 1600°F, templado a 800°F; [f] enfriado en aceite a partir de 1550°F, templado a 800°F; [k] enfriado en aceite a partir de 1525°F, templado a 800°F; [l] normalizado a 1650°F, recalentado a 1475°F, enfriado en aceite y templado a 800°F; [m] normalizado a 1625°F, recalentado a 1550°F, enfriado en agua y templado a 800°F; [n] carburizado 10 h a 1680°F, enfriado en crisol, enfriado con aceite a partir de 1525°F, templado a 300°F; [o] normalizado a 1600°F, enfriado en aceite a partir de 1575°F, templado a 1000°F; [p] enfriado en aceite y templado a 800°F; [q] normalizado a 1650°F, recalentado a 1625°F, enfriado en aceite agitado, templado a 800°F; [r] normalizado a 1600°F, recalentado a 1575°F, enfriado en aceite agitado, templado a 800°F.

NOTA: °C = (°F − 32) × 5/9. Para convertir unidades térmicas británicas por hora-pie grados Fahrenheit en watts por metro-grados Celsius, multiplíquese por 0.8606; para convertir unidades térmicas británicas por libras fuerza-grados Fahrenheit en kilojoules por kilogramo-grados Celsius, multiplíquese por 0.2388; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 0.006895; y para convertir libras fuerza-pie en joules, multiplíquese por 0.7375.

TABLA 23-9 Ale

Aleación
Hierro colado gris
Hierro colado maleabl
Hierro colado dúctil
Hierro colado
Hierro colado
Hierro colado
Hierro colado austenít dúctil
Hierro colado austenít dúctil
Hierro colado al silici

* *Con autorización*
† Los valores que s
‡ Propiedades usual

aleación es resister
tes, como el cloro
las pocas aleacion
Una variación m
mente inmune a la
tadas por el calor d

TABLA 23-10

Tipo AISI	UNS
403	S40300
410	S41000
414	S41400
416	S41600
416Se	S41623
420	S42000
420F	S42020
422	S42200
431	S43100
440A	S44002
440B	S44003
440C	S44004
501	S50100
502	S50200

* *Cortesía de Na*
† Los valores dad
‡ Propiedades us
§ Mínimos.

TABLA 23-9 Aleaciones de hierro colado *

Aleación	ASTM	UNS	Composición, % †	Condición	Propiedades mecánicas ‡: Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
Hierro colado gris	A159 (G3000)	F10006	3.1-3.4 C, 0.6-0.9 Mn, 1.9-2.3 Si	Como fundido	....	30 (207)	...	187–241
Hierro colado maleable	A602 (M3210)	F20000	2.2-2.9 C, 0.15-1.25 Mn, 0.9-1.90 Si	Templado	32 (229)	50 (345)	12	130
Hierro colado dúctil	A395 (60-40-18)	F32800	Sin especificar	Templado	40 (276)	60 (414)	18	170
Hierro colado	A436(1)	F41000	3.0 C, 1.5-2.5 Cr, 5.5-7.5 Cu, 0.5-1.5 Mn, 13.5-17.5 Ni, 1.0-2.8 Si	Como fundido	....	25 (172)	...	150
Hierro colado	A436(2)	F41002	3.0 C, 1.5-2.5 Cr, 0.50 Cu, 0.5-1.5 Mn, 18-22 Ni, 1.0-2.8 Si	Como fundido	....	25 (172)	...	145
Hierro colado	A436(5)	F41006	2.4 C, 0.1 Cr, 0.5 Cu, 0.5-1.5 Mn, 34-36 Ni, 1.0-2.0 Si	Como fundido	....	20 (138)	...	110
Hierro colado austenítico dúctil	A439(D-2)	F43000	3.0 C, 1.75-2.75 Cr, 0.7-1.25 Mn, 18-22 Ni, 1.5-3.,0 Si	Como fundido	30 (207)	58 (400)	...	170
Hierro colado austenítico dúctil	A439 (D-5)	F43006	2.4 C, 0.1 Cr, 1.0 Mn, 34-36 Ni, 1.0-2.8 Si	Como fundido	30 (207)	55 (379)	...	155
Hierro colado al silicio	A518	F47003	0.7-1.1 Cr, 0.5 Cr, 0.5 Cu, 1.50 Mn, 0.5 Mo, 14.2-14.75 Si	Como fundido	....	16 (110)	...	520

* *Con autorización de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Los valores que se dan con una sola cifra indican valores máximos.
‡ Propiedades usuales a temperatura ambiente.

aleación es resistente a las soluciones de cloruro fuertemente oxidantes, como el cloro húmedo y las soluciones de hipoclorito. Es una de las pocas aleaciones que son totalmente resistentes al agua de mar.

Una variación más reciente es el **Hastelloy C-4** que es casi totalmente inmune a la corrosión intergranular selectiva en las zonas afectadas por el calor de la soldadura.

El **Chlorimet 3** es una aleación que se consigue sólo en la forma fundida y es similar al Hastelloy C en contenido de aleación y en resistencia a la corrosión.

El **Inconel 600** (80% de Ni, 16% de Cr, 7% de Fe) se debe mencionar también como aleación alta. No contiene molibdeno. El grado resistente a la corrosión se recomienda para ambientes reductores-oxidan-

TABLA 23-10 Aceros inoxidables martensíticos forjados estándares *

Tipo AISI	UNS	Composición, % †: Cr	Ni	Mo	C	Otros	Propiedades mecánicas ‡: Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
403	S40300	11.5-13.0	....	....	0.15	.....	40 (276)	75 (517)	35	155
410	S41000	11.5-13.5	....	....	0.15	.....	35 (241)	70 (483)	30	150
414	S41400	11.5-13.5	1.25-2.5	....	0.15	.....	90 (621)	115 (793)	20	235
416	S41600	12-14	....	0.6	0.15	0.15S§	40 (276)	75 (517)	30	155
416Se	S41623	12-14	....	....	0.15	0.15Se§	40 (276)	75 (517)	30	155
420	S42000	12-14	....	....	0.15	.....	50 (345)	95 (655)	20	195
420F	S42020	12-14	....	0.6	0.15§	0.155§	55 (379)	95 (655)	22	220
422	S42200	11-13	0.5-1.0	0.75-1.25	0.20-0.25	0.15-0.30 V, 0.75-1.25 W	125 (862)	145 (1000)	18	320
431	S43100	15-17	1.25-2.5	....	0.20	.....	95 (665)	125 (862)	20	260
440A	S44002	16-18	....	0.75	0.6-0.75	.....	60 (414)	105 (724)	20	210
440B	S44003	16-18.0	....	0.75	0.75-0.95	.....	62 (427)	107 (738)	18	215
440C	S44004	16-18	....	0.75	0.95-1.20	.....	65 (448)	110 (758)	14	220
501	S50100	4-6	....	0.40-0.65	0.10§	.....	30 (207)	70 (483)	28	160
502	S50200	4-6	....	0.40-0.65	0.10	.....	25 (172)	65 (448)	30	150

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Los valores dados con una sola cifra indican valores máximos, a menos que se indique otra cosa.
‡ Propiedades usuales a temperatura ambiente para placas templadas.
§ Mínimos.

TABLA 23-11 Aceros inoxidables ferríticos forjados estándares *

		Composición, % †							Propiedades mecánicas ‡			
Tipo AISI	UNS	Cr	C	Mn	Si	P	S	Otros	Resistencia a la cedencia kip/in2 (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in2 (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
405	S40500	11.5-14.5	0.08	1.0	1.0	0.04	0.03	0.1-0.3 Al	40 (276)	65 (448)	30	150
409	S40900	10.5-11.75	0.08	1.0	1.0	0.045	0.045	(6 × C) Ti§	35 (241)	65 (448)	25	137
429	S42900	14-16	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	.....	40 (276)	70 (483)	30	163
430	S43000	16-18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	.....	40 (276)	75 (517)	30	160
430F	S43020	16-18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.15¶	0.6 Mo	55 (379)	80 (552)	25	170
430FSe	S43023	16-18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.06	0.15 Se¶	55 (379)	80 (552)	25	170
434	S43400	16-18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo	53 (365)	77 (531)	23	160
436	S43600	16-18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo (5 ö C)(Cb + Ta)§	53 (365)	77 (531)	23	160
442												
446	S44200	18-23	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03	.....	45 (310)	80 (552)	20	185
	S44600	23-27	0.20	1.5	1.0	0.04	0.03	0.25N	55 (379)	85 (586)	25	160

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Los valores que se dan con una sola cifra son los valores máximos, a menos que se indique otra cosa.
‡ Propiedades usuales de temperatura de placas templadas.
§ Máximo a 0.70.
¶ Mínimo.

TABLA 23-12 Aceros inoxidables austeníticos forjados estándares *

		Composición, % †							Propiedades mecánicas †			
Tipo AISI	UNS	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Otros	Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in²(MPa)	Elongación, %	Dureza HB
201	S20100	16-18	3.5-5.5	...	0.15	1.0	5.5-7.5	0.25 N	55 (379)	115 (793)	55	185
202	S20200	17-19	4-6	...	0.15	1.0	7.5-10.	0.25 N	55 (379)	105 (724)	55	185
301	S30100	16-18	6-8	...	0.15	1.0	2.0	...	40 (276)	105 (724)	55	165
302	S30200	17-19	8-10	...	0.15	1.0	2.0	...	35 (241)	90 (621)	60	150
302B	S30215	17-19	8-10	...	0.15	2.0-3.0	2.0	...	40 (276)	90 (621)	50	165
303	S30300	17-19	8-10	0.6	0.15	1.0	2.0	0.15 S,§ 0.2 P	35 (241)	90 (621)	50	160
303Se	S30323	17-19	8-10	...	0.15	1.0	2.0	0.15 Se,§ 0.2 P	35 (241)	90 (621)	50	160
304	S30400	18-20	8-10.5	...	0.08	1.0	2.0	...	35 (241)	82 (565)	60	149
304L	S30403	18-20	8-12	...	0.03	1.0	2.0	...	33 (228)	79 (545)	60	143
304N	S30451	18-20	8-10.5	...	0.08	1.0	2.0	0.100.16 N	48 (331)	90 (621)	50	180
308	S30800	19-21	10-12	...	0.08	1.0	2.0	...	30 (207)	85 (586)	55	150
309	S30900	22-24	12-15	...	0.20	1.0	2.0	...	40 (276)	95 (655)	45	170
309S	S30908	22-24	12-15	...	0.08	1.0	2.0	...	40 (276)	95 (655)	45	170
310	S31000	24-26	19-22	...	0.25	1.5	2.0	...	45 (310)	95 (655)	50	170
310S	S31008	24-26	19-22	...	0.08	1.5	2.0	...	45 (310)	95 (655)	50	170
314	S31400	23-26	19-22	...	0.25	1.5-3.0	2.0	...	50 (345)	100 (609)	45	180
316	S31600	16-18	10-14	2.0-3.0	0.08	1.0	2.0	...	36 (248)	82 (565)	55	149
316L	S31603	16-18	10-14	2.0-3.0	0.03	1.0	2.0	...	34 (234)	81 (558)	55	146
316N	S31651	16-18	10-14	2.0-3.0	0.08	1.0	2.0	0.10–0.16 N	42 (290)	90 (621)	55	180
317	S31700	18-20	11-15	3.0-4.0	0.08	1.0	2.0	...	40 (276)	85 (586)	50	160
317L	S31703	18-20	11-15	3.0-4.0	0.03	1.0	2.0	...	35 (241)	85 (586)	55	150
321	S32100	17-19	9-12	...	0.08	1.0	2.0	(5 × C) Ti§	30 (207)	85 (586)	55	160
329	S32900	25-30	3-6	1.0-2.0	0.10	1.0	2.0	...	80 (552)	105 (724)	25	230
347	S34700	17-19	9-13	...	0.08	1.0	2.0	(10 × C)(Cb + Ta)§	35 (241)	90 (641)	50	160
348	S34800	17-19	9-13	...	0.08	1.0	2.0	(10 × C)(Cb + Ta)¶ 0.20 Co	35 (241)	90 (621)	50	160

* *Con autorización de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Los valores de una sola cifra son los máximos, a menos que se indique lo contrario.
‡ Propiedades usuales a la temperatura ambiente de placas templadas en soluciones.
§ Mínimo.
¶ Mínimo exceptuando Ta = 0.1, que es máximo.

tes, sobre todo a tem
la aleación resiste la
sobresaliente en su
últimos están esenci
Las aleaciones qu
gran número de alea
química. Para una re
las referencias que s

ALEACIONES

Níquel y sus ale
mente en cualquier
vaciadas. Se puede
soldadura. En gene
rrosión, mientras q
ciones alcalinas ne
ricas moderadas no
el manejo de álcali
de pureza elevada,
clorados y el fenol
cenan en el mismo
su contaminación.
Existe comercial
quel. Muchas se me
nes vaciadas y las
400, con 67% de N
res. Esta aleación
puede fabricar y un
rrosión es superior
níquel en ambiente
aleación se puede
(por debajo de 80
corrosión. El meta
115°C (235°F). Lo
pero no soporta los
Aluminio y sus
en prácticamente t
cluyendo vaciados
aquélla que corres
liza en muchas apli
vada conductivida
aplicaciones eléct
y por lo común, se
protección de gas i
El **aluminio co**
ción de 69 MPa (1
trabajo en frío. Un
minuye considera
resistencia sea in
(400°F) es la temp
minio; no obstant
temperatura y se p
El aluminio pos
cas, así como tam
aguas dulces, salo
aluminio, aunque
trado (por encima
con soluciones cá
Es preciso obse
nio (véase la Tab
mejoradas por en
minio forjadas qu
la tracción de 90
cuando se endur
hasta 572 MPa (8
nio poseen por lo

as ‡

Elongación, %	Dureza HB
30	150
25	137
30	163
30	160
25	170
25	170
23	160
23	160
20	185
25	160

quese por 145.04.

nicas †

ngación, %	Dureza HB
55	185
55	185
55	165
60	150
50	165
50	160
50	160
60	149
60	143
50	180
55	150
45	170
45	170
50	170
50	170
45	180
55	149
55	146
55	180
50	160
55	150
55	160
25	230
50	160
50	160

multiplíquese por 145.04.

tes, sobre todo a temperaturas elevadas. Cuando se calienta en el aire, la aleación resiste la oxidación hasta 1100°C (2000°F). La aleación es sobresaliente en su resistencia a la corrosión por gases cuando estos últimos están esencialmente libres de azufre.

Las aleaciones que se han citado son los ejemplos característicos de gran número de aleaciones altas patentadas de empleo en la industria química. Para una relación mayor con datos más extensos, consúltense las referencias que se proporcionan.

ALEACIONES Y METALES NO FERROSOS

Níquel y sus aleaciones El níquel se puede obtener prácticamente en cualquier forma maquinada, así como también en piezas vaciadas. Se puede maquinar con facilidad y unirse por medio de soldadura. En general, las condiciones oxidantes favorecen la corrosión, mientras que las reductoras retrasan sus ataques. Las soluciones alcalinas neutras, el agua de mar y las condiciones atmosféricas moderadas no afectan al níquel. El metal se utiliza mucho para el manejo de álcalis, sobre todo en la concentración de sosa cáustica de pureza elevada, su almacenamiento y embarque. Los disolventes clorados y el fenol se purifican con frecuencia en níquel y se almacenan en el mismo metal, para evitar la decoloración del producto y su contaminación.

Existe comercialmente gran número de aleaciones con base de níquel. Muchas se mencionaron en el análisis anterior sobre las aleaciones vaciadas y las altas. Una de las más conocidas es el metal **Monel 400**, con 67% de Ni y 30% de Cu. Existe en todas las formas estándares. Esta aleación de níquel-cobre es dúctil y dura, además de que se puede fabricar y unir con facilidad. En general, su **resistencia a la corrosión** es superior a la de sus componentes, y es más resistente que el níquel en ambientes reductores y más que el cobre en los oxidantes. La aleación se puede utilizar para ácido sulfúrico relativamente diluido (por debajo de 80%), aunque la aireación da como resultado mayor corrosión. El metal Monel maneja ácido fluorhídrico, hasta 92% y 115°C (235°F). Los álcalis tienen pocos efectos sobre esta aleación, pero no soporta los ambientes reductores o muy oxidantes.

Aluminio y sus aleaciones El aluminio y sus aleaciones se hacen en prácticamente todas las formas en las que se producen metales, incluyendo vaciados. La conductividad térmica del aluminio es 60% de aquélla que corresponde al cobre puro. El aluminio sin aleación se utiliza en muchas aplicaciones de transferencia de calor. Debido a su elevada conductividad eléctrica, el aluminio tiene gran aceptación en las aplicaciones eléctricas. Es uno de los metales más fáciles de trabajar, y por lo común, se une mediante técnicas de soldadura por arco con protección de gas inerte.

El **aluminio comercialmente puro** tiene una resistencia a la tracción de 69 MPa (10 000 lbf/in^2); pero se puede fortalecer mediante el trabajo en frío. Una limitación del aluminio es que la resistencia disminuye considerablemente por encima de 150°C (300°F). Cuando la resistencia sea importante, se considera por lo común que 200°C (400°F) es la temperatura más elevada que resulta segura para el aluminio; no obstante el aluminio tiene propiedades excelentes a baja temperatura y se puede utilizar a −250°C (−420°F).

El aluminio posee resistencia elevada a las condiciones atmosféricas, así como también a los vapores y los humos industriales y a las aguas dulces, salobres o saladas. Muchos ácidos minerales atacan al aluminio, aunque el metal se puede utilizar con ácido nítrico concentrado (por encima de 82%) y ácido acético glacial. No se puede utilizar con soluciones cáusticas fuertes.

Es preciso observar que existen innumerables **aleaciones de aluminio** (véase la Tabla 23-17). Muchas poseen propiedades mecánicas mejoradas por encima de las del aluminio puro. Las aleaciones del aluminio forjadas que se pueden tratar térmicamente tienen resistencias a la tracción de 90 a 228 MPa (13 000 a 33 000 lbf/in^2), ya templadas; cuando se endurecen plenamente, las resistencias pueden elevarse hasta 572 MPa (83 000 lbf/in^2). No obstante, las aleaciones de aluminio poseen por lo común una resistencia más baja a la corrosión que el metal puro. Las aleaciones **revestidas (Alclad)** se han desarrollado para superar esta dificultad. El Alclad consiste en una capa de aluminio ligada metalúrgicamente a una aleación central.

La resistencia a la corrosión del aluminio y sus aleaciones tiende a hacerlo muy sensible a las trazas de contaminación. Cantidades muy pequeñas de mercurio metálico, iones de metales pesados o iones cloruro son causas de falla rápida en condiciones que de otro modo serían completamente aceptables.

Cuando los aceros de aleación no proporcionan una protección adecuada contra la corrosión—sobre todo contra los ataques sulfídicos—, se puede utilizar acero con un **recubrimiento superficial aluminizado**. Un recubrimiento de aluminio rociado sobre un acero no tiene probabilidades de resquebrajarse ni fisurarse, pero por lo común no es continuo y puede dejar algunas zonas de acero sin protección. El acero "aluminizado" por inmersión en caliente recibe un recubrimiento continuo y ha resultado satisfactorio en muchas aplicaciones, sobre todo cuando se encuentran presentes el azufre y el sulfuro de hidrógeno. Se usa también para proteger el aislamiento térmico y como protección de los equipos contra la intemperie. El acero recubierto resiste el fuego mejor que el aluminio puro.

Cobre y sus aleaciones El cobre y sus aleaciones se emplean en el procesamiento químico, sobre todo cuando la conductividad térmica y la eléctrica son factores importantes. La conductividad térmica del cobre es dos veces la del aluminio y 90% la de la plata. Existe gran número de aleaciones de cobre, incluyendo latones (Cu-Zn), bronces (Cu-Sn) y cuproníqueles.

El **cobre** tiene propiedades excelentes a bajas temperaturas y se utiliza a −200°C (−320°F). La soldadura fuerte y la normal son métodos comunes para unir el cobre y es también posible, aunque difícil, la soldadura autógena. En general, el cobre tiene resistencia elevada a las atmósferas industriales y marinas, el agua de mar, los álcalis y los disolventes. Los ácidos oxidantes corroen con rapidez el cobre. Sin embargo, sus aleaciones tienen propiedades bastante distintas a las del cobre comercial.

Los **latones** con hasta 15% de Zn son dúctiles, pero difíciles de maquinar. La capacidad para el maquinado mejora al aumentar el contenido de Zn hasta un 36%. Los latones con menos de 20% de Zn tienen una resistencia a la corrosión equivalente a la del cobre; pero con mejores resistencias a la tracción. Los latones con 20 a 40% de Zn tienen una menor resistencia a la corrosión y son propensos a la deszinficación y a la fractura por corrosión por esfuerzo, sobre todo cuando se encuentra presente el amoniaco.

Los **bronces** son muy similares a los latones en las propiedades mecánicas y a los latones de alto contenido de zinc en la resistencia a la corrosión (con excepción de que los bronces no se ven afectados por la fractura por esfuerzo). Los **bronces de aluminio y silicio** son muy aceptados en las industrias de procesamiento porque combinan buena fuerza con gran resistencia a la corrosión.

Los **cuproníqueles** (10 a 30% de Ni) han llegado a ser muy importantes como aleaciones de cobre. Tienen la mayor resistencia a la corrosión de todas las aleaciones de cobre y encuentran aplicaciones en tubos para intercambiadores de calor. Su resistencia al agua de mar es particularmente notable.

Plomo y sus aleaciones El plomo de pureza química de más de 99.9% se utiliza principalmente en la industria química en ambientes que forman una película protectora delgada, insoluble y que se autorregenera, constituida, por ejemplo, por sales como sulfatos, carbonatos o fosfatos. Las películas de nitratos, acetatos y cloruros son más solubles y por esto proporcionan poca protección.

Las aleaciones de plomo con antimonio, estaño y arsénico ofrecen mejoras limitadas en sus propiedades mecánicas, y la utilidad del plomo se ve restringida principalmente por sus cualidades estructurales tan malas. Tiene un punto de fusión bajo y un alto coeficiente de expansión y es un material muy dúctil que se deforma progresivamente cuando se le aplica un esfuerzo de tensión tan bajo como 1 MPa (145 lbf/in^2).

Titanio El titanio ha llegado a ser cada vez más importante como material de construcción. Es fuerte y de peso mediano. Su resis-

Tabla 23-13 Aceros inoxidables especiales*

Aleación	UNS	Composición, % †							Propiedades mecánicas ‡			
		Cr	Ni	Mo	C	Mn	Si	Otros	Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
A-286	K66286	13.5–16	24–27	1.0–1.5	0.08	2.0	1.0	1.90–2.35 Ti, 0.1–0.5 V, 0.001–0.01 B, 8 × C–1.0 Cb	100 (690)	140 (970)	20	
20Cb-3	N08020	19–21	32–38	2.0–3.0	0.07	2.0	1.0	3.0–4.0 Cu	53 (365)	98 (676)	33	185
20Mod	N08320	21–23	25–27	4.0–6.0	0.05	2.5	1.0	(4.0 × C) Ti min.	43 (296)	84 (579)	42	160
PH13-8Mo	S13800	12.25–13.25	7.5–8.5	2.0–2.5	0.05	0.2	0.1	0.90–1.35 Al	120 (827)	160 (1100)	17	300
PH14-8Mo	S14800	13.75–15.0	7.75–8.75	2.0–3.0	0.05	1.0	1.0	0.75–1.5 Al, 0.15–45 Cb	55–210 (380–1450)	125–230 (860–1540)	2–25	200–450
15-5PH	S15500	14.0–15.5	3.5–5.5	. . . .	0.07	1.0	1.0	2.5–4.5 Cu	145 (1000)	160 (1100)	15	320
PH15-7Mo	S15700	14.0–16.0	6.5–7.75	2.0–3.0	0.09	1.0	1.0	0.75–1.5 Al, 0.15–0.45 Cb	55–210 (380–1450)	130–220 (900–1520)	2–35	200–450
17-4PH	S17400	15.5–17.5	3.0–5.0	. . . .	0.07	1.0	1.0	3.0–5.0 Cu, 0.4 Al	145 (1000)	160 (1100)	15	320
W	S17600	16.0–17.5	6.0–7.5	. . . .	0.08	1.0	1.0	0.4–1.20 Ti	90–200 (620–1380)	135–210 (930–1450)	3–12	260–420
17-7PH	S17700	16.0–18.0	6.5–7.75	. . . .	0.09	1.0	1.0	0.75–1.5 Al	40 (276)	130 (710)	10	185
216	S21600	17.5–22.0	5.0–7.0	2.0–3.0	0.08	7.5–9.0	1.0	0.25–0.5 N	70 (480)	115 (790)	45	200
Nitronic 60	S21800	16.0–18.0	8.0–9.0	. . . .	0.10	7.0–9.0	3.5–4.5	0.08–0.18 N	60 (410)	103 (710)	62	210
21-6-9	S21900	18.0–21.0	5.0–7.0	. . . .	0.08	8.0–10.0	1.0	0.15–0.40 N	68 (470)	112 (770)	44	220
AM350	S35000	16.0–17.0	4.0–5.0	2.5–3.25	0.07–0.11	0.5–1.25	0.5	0.07–0.13 N	60–173 (410–1200)	145–206 (1000–1420)	13.5–40	200–400
AM355	S35500	15.0–16.0	4.0–5.0	2.5–3.25	0.10–0.15	0.5–1.25	0.5	. . . . . .	182 (1250)	216 (1490)	19	402–477
Almar 362	S36200	14.0–15.0	6.0–7.0	. . . .	0.05	0.5	0.3	0.55–9.0 Ti	105–185 (124–286)	120–188 (827–1300)	15–13	250–400
18-18-2	S38100	17.0–19.0	17.5–18.5	. . . .	0.08	2.0	1.5–2.5	0.20 × (C + N)	40 (280)	80 (550)	55	165
Stab. 18-2	S44400	17.5–19.5	1.0	1.75–2.5	0.025	1.0	1.0	min.–0.8 Ti + Cb 0.015 N	45 (310)	60 (414)	20	210
26-1	S44625	25.0–27.5	0.5	0.75–1.50	0.01	0.4	0.4	0.5 Ni + Cu	50 (345)	70 (480)	30	165
Stab. 26-1	S44626	25.0–27.0	0.5	0.75–1.50	0.06	0.75	0.75	7 × (C + Ni)–1.0 Ti, 0.15 Cu	50 (345)	70 (480)	30	165
28-4	S44700	28.0–30.0	0.15	3.5–4.2	0.010	0.3	0.2	0.02 N, 0.15 Cu	70 (480)	90 (620)	25	210
28-4-2	S44800	28.0–30.0	2.0–2.5	3.5–4.2	0.010	0.3	0.2	0.02 N, 8 × C Cb min.	85 (590)	95 (650)	25	230
Custom 450	S45000	14.0–16.0	5.0–7.0	0.5–1.0	0.05	1.0	1.0	1.25–1.75 Cu	117–184 (800–1270)	144–196 (990–1350)	14	270–400
Custom 455	S45500	11.0–12.5	7.5–9.5	0.5	0.05	0.5	0.5	1.5–2.5 Cu, 0.8–1.4 Ti	115–220 (790–1500)	140–230 (970–1600)	10–14	290–460

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Los valores que aparecen solos indican los máximos a menos que se indique lo contrario.
‡ Propiedades usuales a temperatura ambiente.

TABLA 23-14 Aceros inoxidables colados estándares resistentes al calor *

ACI	Equivalente AISI	UNS	Composición, %[a] Cr	Ni	C	Mn	Si	Otros	Propiedades mecánicas a 1600°F: A corto plazo — Resistencia a la tracción kip/in2 (MPa)	Elongación, %	Esfuerzo a la ruptura en 1000 h kip/in^2	MPa
HA	. . .	. . . . .	8-10	. . . .	0.2	0.35-0.65	1.0	0.9-1.2 Mo	44 (303)[b]	36[b]	27	186[c]
HC	446	J92605	26-30	4	0.5	1.0	2.0	. . . .	. . . .		1.3	9.0
HD	327	J93005	26-30	4-7	0.5	1.5	2.0	. . . .	23 (159)	18	7.0	48[d]
HE	. . .	J93403	26-30	8-11	0.2-0.5	2.0	2.0					
HF	302B	J92603	18-23	9-12	0.2-0.4	2.0	2.0	. . .	21 (145)	16	4.4	30
HH[e]	. . .	J93503	24-28	11-14	0.2-0.5	2.0	2.0	0.2 N	18.5 (128)	30	3.8	26
HH[f]	309	J93503	24-28	11-14	0.2-0.5	2.0	2.0	0.2 N	21.5 (148)	18	3.8	26
HI	. . .	J94003	26-30	14-18	0.2-0.5	2.0	2.0	. . . .	26 (179)	12	4.8	33
HK	310	J94224	24-28	18-22	0.2-0.6	2.0	2.0	. . . .	23 (159)	16	6.0	41
HL	. . .	J94604	28-32	18-22	0.2-0.6	2.0	2.0	. . . .	30 (207)			
HN	. . .	J94213	19-23	23-27	0.2-0.5	2.0	2.0	. . . .	20 (138)	37	7.4	51
HP	. . .	J95705	24-28	33-37	0.35-0.75	2.0	2.5	. . . .	26 (179)	27	7.5	52
HT	310	J94605	13-17	33-37	0.35-0.75	2.0	2.5	. . . .	19 (131)	26	5.8	40
HU	. . .	J95405	17-21	37-41	0.35-0.75	2.0	2.5	. . . .	20 (138)	20	5.2	36
HW	. . .	. . . . .	10-14	58-62	0.35-0.75	2.0	2.5	. . . .	19 (131)		4.5	31
HX	. . .	. . . . .	15-19	64-68	0.35-0.75	2.0	2.5	. . . .	20.5 (141)	48	4.0	28

* Cortesía de *National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
[a] Los valores de una sola cifra indican valores máximos; S y P tienen un máximo de 0.04; Mo es 0.5 máximo.
[b] A 593°C (1100°F).
[c] A 538°C (1000°F).
[d] A 760°C (1400°F).
[e] Tipo I; parcialmente ferrítico.
[f] Tipo II; totalmente austenítico.

tencia a la corrosión es muy superior en medios oxidantes y reductores moderados (una aleación de Ti-Pd tiene una resistencia más alta en ambientes reductores). Por lo común, el titanio no es afectado por los ataques de impacto, la corrosión por grietas y los ataques de picaduras en el agua del mar. Su resistencia general al agua del mar es excelente. El titanio es resistente al ácido nítrico en todas las concentraciones, excepto con el nítrico fumante rojo. El metal resiste también al cloruro férrico, el cloruro cúprico y otras soluciones calientes de cloruro; sin embargo, hay ciertas desventajas que hacen que se limite el uso del titanio. El titanio no es fácil de conformar; tiene una deformación residual elevada y tiende a ludirse, además de que la soldadura se debe efectuar siempre en una atmósfera inerte.

Circonio El circonio se desarrolló originalmente como material de construcción para reactores atómicos. El circonio de grado reactor contiene muy poco hafnio, que podría modificar las propiedades de absorción de neutrones del circonio. El circonio de grado comercial para aplicaciones en procesos contiene 2.5% de hafnio. El circonio se parece al titanio desde el punto de vista de la fabricación. Toda la soldadura se debe hacer en una atmósfera inerte. Tiene una excelente resistencia ante los ambientes reductores. Con frecuencia, los agentes oxidantes aceleran el ataque. También resiste todos los cloruros, excepción hecha del férrico y el cúprico. Hay ciertas aleaciones de titanio y circonio con propiedades mecánicas superiores a las de los metales puros. Las aleaciones de circonio se denominan "Zircalloys".

Tantalio Las propiedades físicas del tantalio son similares a las del acero dulce, con excepción de que el tantalio tiene un punto de fusión más alto. Es dúctil y maleable y se puede trabajar en formas complejas. También se puede soldar mediante técnicas con protección de gas inerte. El metal es prácticamente inerte a muchos ácidos oxidantes y reductores (excepto el sulfúrico fumante). Se ve atacado por el ácido fluorhídrico y los álcalis calientes. Su costo limita su empleo a los serpentines de calentamiento, los calentadores de bayoneta, los enfriadores y los condensadores que funcionan en condiciones muy severas. Cuando se justifica económicamente, se fabrican partes grandes de equipos (reactores, tanques, etc.) con recubrimientos de tantalio, ya sea sueltas (con el anclado adecuado) o ligadas con explosión. Como los recubrimientos con tantalio son generalmente muy delgados, se debe poner atención y cuidados muy particulares en el diseño y los detalles de fabricación.

MATERIALES INORGÁNICOS NO METÁLICOS

Vidrio y acero vidriado El vidrio es un producto inorgánico de fusión que al enfriarse se vuelve rígido sin cristalizar. Presenta propiedades exclusivas comparado con los metales y requiere por esto consideraciones especiales en su diseño y uso.

El vidrio tiene una resistencia excelente a todos los ácidos excepto al fluorhídrico y al H_3PO_4 concentrado caliente. Está propenso también a ataques por las soluciones alcalinas calientes. Es particularmente adecuado para tuberías, cuando se desea que sean transparentes.

Por supuesto, el principal inconveniente es su fragilidad y está sujeto también a recibir daños debidos a los choques térmicos. No obstante, el vidrio blindado con fibra de vidrio de epoxipoliéster se puede proteger con facilidad contra las roturas. Por otra parte, el acero vidriado combina la resistencia a la corrosión del vidrio con la fuerza estructural del acero. En consecuencia, los recubrimientos de vidrio son resistentes a todas las concentraciones de ácido clorhídrico hasta 120°C (250°F), a concentraciones diluidas de sulfúrico hasta el punto de ebullición, a sulfúrico concentrado hasta 230°C (450°F) y a todas las concentraciones de ácido nítrico hasta el punto de ebullición. Hay un vidrio resistente a los ácidos con resistencia mejorada a los álcalis (hasta un pH de 12).

‡ Propiedades usuales a temperatura ambiente.

TABLA 23-15 Aceros inoxidables colados estándar resistentes a la corrosión *

ACI	Equivalente AISI	UNS	Composición, %[a] Cr	Ni	Mo	C	Mn	Si	Otros	Propiedades mecánicas[b] Resistencia a la cedencia kip/in^2 (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in^2 (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
CA-15	410	J91150	11.5-14	1.0	0.5	0.15	1.00	1.50	.....	150(1034)[c]	200(1379)[c]	7c	390[c]
CA-15M	...	J91151	11.5-14	1.0	0.15-10	0.15	1.00	1.50	.....	150(1034)[c]	200(1379)[c]	7c	390[c]
CA-6NM	...	J91540	11.5-14	3.5-4.5	0.4-10	0.06	1.00	1.00	.....	100 (690)[d]	120 (827)[d]	4d	269[d]
CA-40	420	J91153	11.5-14	1.0	0.5	0.20-0.40	1.00	1.50	.....	165(1138)[c]	165(1138)[c]	1c	470[c]
CB-30	431	J91803	18.21	2.0	....	0.30	1.00	1.50	.....	60 (414)[e]	95 (655)[e]	15e	195[e]
CC-50	446	J92615	26-30	4.0	....	0.50	1.00	1.50	.....	65 (448)[f]	97 (669)[f]	18f	210[f]
CE-30	312	J93423	26-30	8-11	....	0.30	1.50	2.00	.....	63 (434)	97 (669)	18	190
CB-7Cu	(17-4PH)	......	(16)	(4)	....	0.07	....	....	(3) Cu	165(1138)	......	3	418
CD-4MCu	...	......	25-26.5	4.75-6.0	1.75-2.25	0.04	1.00	1.00	2.75-3.25 Cu	82 (565)	108 (745)	25	253
CF-3	304L	J92500	17-21	8-12	....	0.03	1.50	2.00	.....	36 (248)	77 (531)	60	140
CF-8	304	J92600	18-21	8-11	....	0.08	1.50	2.00	.....	37 (255)	77 (531)	55	140
CF-20	302	J92602	18-21	8-11	....	0.20	1.50	2.00	.....	36 (248)	77 (531)	50	163
CF-3M	316L	J92800	17-21	9-13	2.0-3.0	0.03	1.50	1.50	.....	38 (262)	80 (552)	55	150
CF-8M	316	J92900	18-21	9-12	2.0-3.0	0.08	1.50	2.00	.....	42 (290)	80 (552)	50	160
CF-12M	...		18-21	9-12	2.0-3.0	0.12	1.50	2.00	.....	42 (290)	80 (552)	50	160
CG-12	317	J93000	18-21	9-13	3.0-4.0	0.08	1.50	1.50	.....	44 (303)	83 (572)	45	170
CF-8C	347	J92710	18-21	9-12	....	0.08	1.50	2.00	(8 × C) Cb[g]	38 (262)	77 (531)	39	149
CF-16F	303	J92701	18-21	9-12	1.50	0.16	1.50	2.00	.....	40 (276)	77 (531)	52	150
CG-12	...	J93001	20-23	10-13	....	0.12	1.50	2.00	.....	28 (193)	......	35	
CH-20	309	J93402	22-26	12-15	....	0.20	1.50	2.00	.....	50 (345)	88 (607)	38	190
CK-20	310	J94202	23-27	19-22	....	0.20	1.50	2.00	.....	38 (262)	76 (524)	37	144
CN-7M	...	J95150	19-22	27.5-30.5	2.0-3.0	0.07	1.50	1.50	.....	32 (221)	69 (476)	48	130

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
[a] Los valores de una sola cifra son las máximos, exceptuándose aquéllos entre paréntesis, que son los mínimos. P y S presentan valores máximos a 0.04.
[b] Propiedades usuales a la temperatura ambiente para materiales templados en solución, a menos que se indique otra cosa.
[c] Para material enfriado en aire desde 1800°F y templado a 600°F.
[d] Para material enfriado en aire desde 1750°F y templado a 1100-1150°F.
[e] Para material templado a 1450°F, enfriado en horno a 1000°F, y luego enfriado al aire.
[f] Enfriado al aire desde 1900°F.
[g] 1.0 es el máximo.

Un compuesto con un núcleo de metal-cerámica cristalina forman un vidrio que tiene propiedades mecánicas comparables con las del acero vidriado convencional. Los calentamientos controlados a altas temperaturas unen química y físicamente la cerámica al acero, las aleaciones con base de níquel y los metales refractarios. Estos materiales resisten el gas del cloruro de hidrógeno corrosivo, el cloro o el dióxido de azufre hasta 650°C (1200°F). Resisten todos los ácidos excepto el fluorhídrico hasta 180°C (350°F). Su resistencia a los impactos es 18 veces la del vidrio de seguridad; la resistencia a la abrasión es superior al esmalte de porcelana. Tienen de 3 a 4 veces la resistencia a los choques térmicos del acero vidriado.

Porcelana y loza Los materiales de porcelana y loza son tan resistentes a los ácidos y a los productos químicos como el vidrio, con las ventajas de una resistencia mayor. Esto se contrarresta hasta cierto punto por su baja conductividad térmica y los materiales pueden sufrir daños con bastante facilidad debido a los choques térmicos. Se utilizan **esmaltes de porcelana** para recubrir acero, pero el esmalte tiene una resistencia química ligeramente inferior. También existen algunos recubrimientos refractarios capaces de tolerar temperaturas muy elevadas.

Construcción de ladrillos La construcción recubierta de ladrillos se puede utilizar para muchas condiciones muy corrosivas cuando las aleaciones altas no sirvan. Los ladrillos comunes se hacen de carbón, esquisto rojo o materiales refractarios a prueba de ácidos. El ladrillo de esquisto rojo no se emplea por encima de 175°C (350°F) debido a que presenta astillamientos. Los materiales refractarios a prueba de ácidos se pueden utilizar hasta 870°C (1600°F).

Se utilizan con los ladrillos ciertos materiales de **cemento**. Entre los comunes se encuentran las resinas fenólicas y de furano, los poliésteres, el azufre, los silicatos y los materiales con base de epoxi. Los poliésteres y los furanos rellenos de carbón son buenos contra los disolventes, las sales y los ácidos no oxidantes. Las resinas rellenas de sílice no se deben utilizar contra el ácido fluorhídrico y el fluosilícico. Los cementos con base de azufre se limitan a 93°C (200°F), mientras que las resinas se pueden utilizar hasta aproximadamente 180°C (350°F). Los cementos con base de silicato de sodio son buenos contra los ácidos hasta 400°C (750°F).

Debido a la expansión diferencial térmica del ladrillo, sus juntas y el sustrato de la vasija necesitan un recubrimiento intermedio de plomo, asfalto, caucho o plástico. Esta membrana funciona como una barrera para proteger el sustrato del daño por corrosión. Un diseño especial de ladrillo preesforzado que mantiene al ladrillo en compresión mediante el empleo de un mortero de resina de expansión controlada y un material de asentamiento de ladrillo evita el uso de una membrana elastomérica.

Cemento y concreto El concreto es una mezcla de partículas inertes que sirven de refuerzo en una matriz amorfa de pasta de cemento endurecida. El concreto hecho de cemento portland presenta una resis-

Tabla 23-16 Aleaciones de níquel*

Aleación	UNS	Composición, % † Ni(+Co)§	Cr	Fe	Mo	C	Otros	Condición	Propiedades mecánicas ‡ Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación, %	HB Dureza
200	N02200	99.	. . . . .	0.4	. . . . .	0.15	. . . .	Templado	15–30 (103–207)	55–80 (379–552)	55–40	90–120
201	N02201	99.	. . . . .	0.4	. . . . .	0.02	. . . . . .	Templado	10–25 (69–172)	50–60 (345–414)	60–40	75–102
400	N04400	63–70	. . . . .	1.0–2.5	. . . . .	0.3	28–34 Cu	Templado	25–50 (172–345)	70–90 (483–621)	60–35	110–149
K-500	N05500	63–70	. . . . .	2.0	. . . . .	0.25	2.3–3.15 Al 0.35–0.85 Ti, 30 Cu	Endurecido por envej. Templado	85–120 (586–827)	130–165 (896–1138)	35–20	250–315
600	N06600	72.	14–17	6–10	. . . . .	0.15	. . . .	Templado	30–50 (207–345)	80–100 (552–690)	55–35	120–170
601	N06601	58–63	21–25	Bal.	. . . . .	0.10	1.0–1.7 Al	Templado	30–60 (207–414)	80–115 (552–793)	70–40	110–150
625	N06625	Bal.	20–23	5	8–10	0.10	3.15–4.15 (Cb + Ta)	Templado	60–95 (414–655)	120–150 (827–1034)	60–30	145–220
706	N09706	39–44	14.5–17.5	Bal.	. . . . .	0.06	. . . .	Tratado por solución y envej.	161 (1110)	193 (1331)	20.	371.
718	N07718	50–55	17–21	Bal.	2.8–3.3	0.08	4.75–5.5 (Cb + Ta)	Tratamiento esp. por calor	171 (1180)	196 (1351)	17.	382.
X-750	N07750	70	14–17	5–9	. . . . .	0.08	0.65–1.15 Ti, 0.2–0.8 Al 0.7–1.2 (Cb + Ta) 2.25–2.75 Ti, 0.4–1.0 Al	Tratamiento esp. por calor	115–142 (793–979)	162–193 (1117–1331)	30–15	300–390
800	N08800	30–35	19–23	Bal.	. . . . .	0.10	0.15–0.6 Al, 0.15–0.6 Ti	Templado	30–60 (207–414)	75–100 (517–690)	60–30	120–184
800H	N08800	30–35	19–23	Bal.	. . . . .	0.05–0.10	0.15–0.6 Al, 0.15–0.6 Ti	Tratado por solución	20–50 (138–345)	65–95 (448–655)	50–30	100–184
801	N08801	30–34	19–22	Bal.	. . . . .	0.10	0.75–1.5 Ti	Tratamiento esp. por calor	79.5 (548)	129 (889)	29.5	
825	N08825	38–46	19.5–23.5	Bal.	2.5–3.5	0.05	1.5–3.0 Cu, 0.6–1.2 Ti	Templado	35–65 (241–448)	85–105 (586–724)	50–30	120–180
B-2	N10665	Bal.	1.0	2	26–30	0.02	. . . .	Templado	76 (524)	139 (958)	53.	210
C-276	N10276	Bal.	14.5–16.5	4–7	15–17	0.02	3.0–4.5 W	Templado	52 (358)	115 (793)	61.	194
C-4	N06455	Bal.	14–18	3	14–17	0.015	0.7 Ti	Templado	61 (421)	116 (800)	54.	194
G	N06007	Bal.	21–23	18–21	5.5–7.5	0.05	1.0–2.0 Mn, 1.5–2.5 Cu 1.75–2.5 (Cb + Ta)	Templado	46 (317)	102 (703)	61.	161
X	N06002	Bal.	20.5–23	17–20	8–10	0.05–0.15	0.2–1.0 W	Templado	56 (386)	110 (758)	45.	178

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.

† Los valores de una sola cifra indican los máximos a menos que se indique otra cosa.

‡ Propiedades usuales a la temperatura ambiente.

§ Los valores solos son los mínimos.

TABLA 23-17 Aleaciones de aluminio

		Composición, %							Propiedades mecánicas †			
Designación AA	UNS	Cr	Cu	Mg	Mn	Si	Otros	Condición‡	Resistencia a la cedencia kip/in^2 (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in^2 (MPa)	Elongación, en 2 in %	Dureza HB
Forjado												
1060	A91060	....	....	....	....	....	99.6 mín. Al	0	4 (28)	10 (69)	43	19
1100	A91100	....	0.05-0.2	....	....	....	99.0 mín. Al	0	5 (34)	13 (90)	45	23
2024	A92024	0.1	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	....	T4	47 (324)	68 (469)	19	120
3003	A93003	....	0.05-0.2	....	1.0-1.5	0.6	....	H14	21 (145)	22 (152)	16	40
5052	A95052	0.15-0.35	0.1	2.2-2.8	0.1	....	....	0	13 (90)	2.8 (193)	30	47
5083	A95083	0.05-0.25	0.1	4.0-4.9	0.4-1.0	0.4	....	0	21 (145)			
5086	A95086	0.05-0.25	0.1	3.5-4.5	0.2-0.7	0.4	....	0	17 (117)	38 (262)	30	
5154	A95154	0.05-0.35	0.1	3.1-3.9	0.1	0.25	....	0	17 (117)	35 (241)	27	58
6061	A96061	0.04-0.35	0.15-0.4	0.8-1.2	0.15	0.4-0.8	....	T6	40 (276)	45 (310)	17	95
6063	A96063	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	0.2-0.6	....	T6	31 (214)	35 (241)	18	73
7075	A97075	0.18-0.28	1.2-2.0	2.1-2.9	0.3	0.40	5.1-6.1 Zn	T6	73 (503)	63 (572)	11	150
Colado												
242.0	A02420	0.25	3.5-4.5	1.2-1.8	0.35	0.7	1.7-2.3 Ni	S-T571	....	29 (200)		
295.0	A02950	....	4.0-5.0	0.03	0.35	0.7-1.5	....	S-T4	....	29 (200)	6	
A332.0	A13320	....	0.5-1.5	0.7-1.3	0.35	11-13	2.0-3.0 Ni	P-T551	....	31 (214)		
B443.0	A24430	....	0.15	0.05	0.35	4.5-6.0	....	S-F	....	17 (117)	3	
514.0	A05140	....	0.15	3.5-4.5	0.35	0.35	....	S-F	....	22 (152)	6	
520.0	A05200	....	0.25	9.5-10.6	0.15	0.25	....	S-T4	22 (152)	42 (290)	12	

FUENTE: Aluminum Association. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04

* Los valores de una sola cifra son valores máximos.

† Propiedades usuales a temperatura ambiente.

‡ S = fundida en arena; P = fundida en molde permanente; otros = designaciones de temple.

tencia limitada a los ácidos y bases y falla mecánicamente después de la absorción de soluciones que forman cristales, como las salmueras y diversos productos químicos orgánicos. Los concretos hechos con cementos resistentes a la corrosión (como el aluminato de calcio) se pueden seleccionar para exponerlos a productos químicos específicos.

Tierras La arcilla es el material primario de construcción para depósitos y albercas de tratamiento de desechos por evaporación. Si existen unos tipos de arcilla en un área geográfica determinada, antes de cada aplicación se deberán verificar características como encogimiento, porosidad, absorción y resistencia química.

MATERIALES ORGÁNICOS NO METÁLICOS

Materiales plásticos En comparación con los materiales metálicos, el empleo de plásticos está limitado a presiones y temperaturas relativamente moderadas [230°C (450°F) se considera como una temperatura alta para los plásticos]. Estos materiales son también menos resistentes a los abusos mecánicos y tienen índices de dilatación elevados, bajas resistencias (termoplásticos) y sólo una resistencia regular a los disolventes. Sin embargo, son de peso ligero y resultan buenos aisladores térmicos y eléctricos, además de que son fáciles de fabricar e instalar y de que tienen bajos factores de fricción.

En general, los plásticos poseen una resistencia excelente a los ácidos minerales débiles y no son afectados por las soluciones de sales inorgánicas —zonas en que los metales no son totalmente seguros. Puesto que los materiales plásticos no se corroen en el sentido electroquímico, ofrecen otra ventaja sobre los metales: la mayor parte de los metales se ve afectada por los cambios ligeros de pH o las impurezas menores, o bien, por el contenido de oxígeno, mientras que los plásticos permanecen resistentes a esos mismos cambios.

Los termoplásticos más importantes que se utilizan comercialmente son polietileno, butadieno estireno acrilonitrilo (ABS), cloruro de polivinilo (PVC), acetato butirato de celulosa (CAB), cloruro de vinilideno (Sarán), fluorocarburos (teflón, Kel-F, Kynar), policarbonatos, polipropileno, nylon y acetales (Delrin). Los plásticos termofijos de importancia son los siguientes: poliéster reforzado con vidrio para usos generales, vidrio epoxi, vidrio de éster vinílico, furano y vidrio fenólico, y de asbesto reforzado.

TERMOPLÁSTICOS

El plástico más resistente a los productos químicos que existe en la actualidad comercialmente es el **tetrafluoroetileno** o **TFE** (teflón). Este termoplástico prácticamente no es afectado por ningún álcali o ácido, con excepción del flúor y el gas de cloro a temperaturas altas, y los metales fundidos. Conserva sus propiedades hasta 260°C (500°F). El **clorotrifluoroetileno** o **CTFE** (Kel-F, Plaskon) posee también una resistencia excelente a la corrosión contra casi todos los ácidos y los álcalis hasta 180°C (350°F). Se ha desarrollado un derivado del teflón a partir de la copolimerización de tetrafluoroetileno y hexafluoropropileno. Esta resina, **FEP**, tiene propiedades similares al TFE, con la excepción de que no se recomienda para exposiciones continuas a temperaturas por encima de 200°C (400°F). Asimismo, el FEP se puede extruir en equipos tradicionales de extrusión, mientras que las piezas de TFE se deben hacer mediante ténicas complejas de "metalurgia de polvo". Otra versión es la del **fluoruro de polivinilideno** o **PVF_2** (Kynar), que tiene una resistencia excelente a los álcalis y a los ácidos hasta 150°C (300°F). Se puede extruir. Uno de los desarrollos más recientes es un copolímero de CTFE y etileno (Halar). Este material tiene una resistencia excelente a los ácidos inorgánicos fuertes, las bases y las sales, hasta 150°C. También se puede extruir.

El **perfluoroalcoxi** o **PFA** (teflón) ostenta las propiedades generales y la resistencia química del FEP a una temperatura que se acerca a 300°C (600°F).

El **polietileno** es el plástico de costo más bajo que se puede obtener comercialmente. Sus propiedades mecánicas son en general bajas, sobre todo por encima de 50°C (120°F) y las tuberías se deben sostener íntegramente. Los grados con carga de carbono son resistentes a la intemperie y los rayos del sol.

TABLA 23-18 Al

Aleación
Forjado
Cobre
Bronce comercial
Latón rojo
Latón de cartucho
Latón amarillo
Metal Muntz
Latón Admiralty
Latón Admiralty
Latón Admiralty
Latón naval
Bronce fosforado
Bronce fosforado
Bronce de aluminio
Bronce de aluminio D
Bronce de aluminio-níqu
Bronce al alto silicio
Bronce de manganeso
Bronce de aluminio
Cobre níquel 90-10
Cobre níquel 70-30
Plata níquel 65-18
Colado
Aleación de cobre con estaño plomo y zinc
Bronce de manganeso
Bronce G
Bronce M
Bronce Ni-Al-Mn
Bronce Ni-Al
Cobre níquel

* *Cortesía de Nationa*

† Los valores que sól

‡ Propiedades usuale

Los **cloruros de** sistencia excelente y a la mayor parte c a los materiales alc carburos clorados i conoce genéricame hidrocarburos clor

Los **polímeros d** buena resistencia a peraturas es de, apr

Los **acetales** po los disolventes org con álcalis y ácidos

El **acetato butir** dos y los álcalis o l cierto hinchamient nicos, pero son ata y los ácidos miner

El **polipropilen** que la del polietile **carbonato** es un p emplear hasta 150'

TABLA 23-18 Aleaciones de cobre *

Aleación	CDA	UNS	Composición, % † Cu	Zn	Sn	Al	Ni	Otros	Propiedades mecánicas ‡ Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación en 2 in, %
Forjado											
Cobre	110	C11000	99.90	....	....	....	....	....	10 (69)	32 (221)	55
Bronce comercial	220	C22000	89-91	Rem.	....	....	....	....	10 (69)	37 (255)	50
Latón rojo	230	C23000	84-86	Rem.	....	....	....	....	10 (69)	40 (276)	55
Latón de cartucho	260	C26000	68.5-71.5	Rem.	....	....	....	....	11 (76)	44 (303)	66
Latón amarillo	270	C27000	63-68.5	Rem.	....	....	....	....	14 (97)	46 (317)	65
Metal Muntz	280	C28000	59-63	Rem.	....	....	....	....	21 (145)	54 (372)	52
Latón Admiralty	443	C44300	70-73	Rem.	0.9-1.2	....	....	0.02-0.1 As	18 (124)	48 (331)	65
Latón Admiralty	444	C44400	70-73	Rem.	0.9-1.2	....	....	0.02-0.1 Sb	18 (124)	48 (331)	65
Latón Admiralty	445	C44500	70-73	Rem.	0.9-1.2	....	....	0.02-0.1 P	18 (124)	48 (331)	65
Latón naval	464	C46400	59-62	Rem.	0.5-1.0	....	....	....	25 (172)	58 (400)	50
Bronce fosforado	510	C51000	Rem.	0.3	4.2-5.8	....	....	0.03-0.35 P	19 (131)	47 (324)	64
Bronce fosforado	524	C52400	Rem	0.2	9.0-11.0	....	....	0.03-0.35 P	28 (193)	66 (455)	70
Bronce de aluminio	613	C61300	86.5-93.8	....	0.2-0.5	6-8	0.5	3.5 Fe	30 (207)	70 (483)	42
Bronce de aluminio D	614	C61400	88.0-92.5	0.2	....	6-8	....	1.5-3.5 Fe, 1.0 Mn	33 (228)	76 (524)	45
Bronce de aluminio-níquel	630	C63000	78-85	0.3	0.2	9-11	4.0-5.5	2.0-4.0 Fe, 1.5 Mn, 0.25 Si	36 (248)	90 (620)	10
Bronce al alto silicio	655	C65500	94.8	1.5	....	....	0.6	0.8 Fe, 0.5-1.3 Mn, 2.8-3.8 Si	21 (145)	56 (386)	63
Bronce de manganeso	675	C67500	57-60	Rem.	0.5-1.5	0.25	....	0.05-0.5 Mn, 0.8-2.0 Fe	30 (207)	65 (448)	33
Bronce de aluminio	687	C68700	76-79	Rem.	....	1.8-2.5	....	0.02-01 As	27 (186)	60 (414)	55
Cobre níquel 90-10	706	C70600	86.5	1.0	....	....	9.0-11.0	1.0-1.8 Fe, 1.0 Mn	16 (110)	44 (303)	42
Cobre níquel 70-30	715	C71500	Rem.	1.0	....	....	29-33	0.4-1.0 Fe, 1.0 Mn	20 (138)	54 (372)	45
Plata níquel 65-18	752	C75200	63-66.5	Rem.	...	....	16.5-19.5	0.25 Fe 0.5 Mn	25 (172)	56 (386)	45
Colado											
Aleación de cobre con estaño plomo y zinc	836	C83600	84-86	4-6	4-6	0.005	1.0	4-6 Pb	17 (117) 28 (193)	37 (255) 71 (490)	30 30
Bronce de manganeso	865	C86500	55-65	36-42	1.0	0.5-1.5	1.0	0.4-2.0 Fe 0.1-1.5 Mn			
Bronce G	905	C90500	86-89	1.0-3.0	9-11	0.005	1.0	....	22 (152)	45 (310)	25
Bronce M	922	C92200	86-90	3.0-5.0	5.5-6.5	0.005	1.0	1.0-2.0 Pb	20 (138)	40 (276)	30
Bronce Ni-Al-Mn	957	C95700	71	....	....	7.0-8.5	1.5-3.0	2.0-4.0 Fe 11-14 Mn	45 (310)	95 (665)	26
Bronce Ni-Al	958	C95800	79	....	....	8.5-9.5	4.0-5.0	3.5-4.5 Fe 0.8-1.5 Mn	38 (262)	95 (655)	25
Cobre níquel	964	C96400	65-69	....	....	....	28-32	0.5-1.5 Cb 0.25-1.5 Fe, 1.5 Mn	37 (255)	68 (469)	28

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.

† Los valores que sólo tienen una cifra representan los máximos, exceptuando al cobre, que es el mínimo.

‡ Propiedades usuales a la temperatura ambiente para materiales templados o colados.

Los **cloruros de polivinilo no plastificados** (tipo 1) tienen una resistencia excelente a los ácidos oxidantes que no están concentrados, y a la mayor parte de los ácidos no oxidantes. Su resistencia es buena a los materiales alcalinos débiles y fuertes. La resistencia a los hidrocarburos clorados no es buena. El cloruro de polivinilideno, que se conoce genéricamente como **Sarán**, tiene una buena resistencia a los hidrocarburos clorados.

Los **polímeros de butadieno estireno acrilonitrilo (ABS)** tienen buena resistencia a los ácidos no oxidantes. El límite superior de temperaturas es de, aproximadamente, 65°C (150°F).

Los **acetales** poseen una resistencia excelente a la mayor parte de los disolventes orgánicos, pero no son satisfactorios para ser utilizados con álcalis y ácidos fuertes.

El **acetato butirato de celulosa** no es afectado por los ácidos diluidos y los álcalis o la gasolina, pero los disolventes clorados provocan cierto hinchamiento. Los nylons resisten a muchos disolventes orgánicos, pero son atacados por los fenoles, los agentes oxidantes fuertes y los ácidos minerales.

El **polipropileno** tiene resistencia química aproximadamente igual que la del polietileno; pero se puede utilizar a 120°C (250°F). El **policarbonato** es un plástico de temperatura relativamente alta. Se puede emplear hasta 150°C (300°F). Su resistencia a los ácidos minerales es buena. Los álcalis fuertes lo descomponen con lentitud; pero no los álcalis débiles. Es parcialmente soluble en los disolventes aromáticos y soluble en los hidrocarburos clorados. El **óxido de polifenileno** tiene buena resistencia a los disolventes alifáticos, los ácidos y las bases, pero baja resistencia a los ésteres, las cetonas y los disolventes aromáticos o clorados.

El **sulfuro de polifenileno (PPS)** no se disuelve en ningún disolvente por abajo de 190 a 205°C (375 a 400°F); las propiedades mecánicas no se afectan por la exposición al aire a 230°C (450°F). Es resistente a las sales y a las bases inorgánicas acuosas.

Polisulfona Se puede emplear a 170°C (340°F) y es muy resistente a los ácidos minerales, álcalis y soluciones salinas, así como a los detergentes, aceites y alcoholes. Sufre el ataque de disolventes orgánicos como cetonas, hidrocarburos clorados e hidrocarburos aromáticos.

Polímeros de poliamida o poliimida Son resistentes a los hidrocarburos alifáticos, aromáticos, clorados o fluorados, así como a muchos sistemas de carácter ácido o básico, pero se degrada por la exposición a sustancias cáusticas a alta temperatura.

Plásticos fijos termoestables o termofijos Entre los materiales termofijos se encuentran los plásticos fenólicos con carga de asbesto, carbono o grafito, vidrio y sílice. Su costo relativamente bajo, sus buenas propiedades mecánicas y su resistencia química (excepto contra

TABLA 23-19 Aleaciones misceláneas*

Aleación	Designación	UNS	Composición, % ‡	Condición	Propiedades mecánicas †: Resistencia a la cedencia kip/in² (MPa)	Resistencia a la tracción kip/in² (MPa)	Elongación, %	Dureza HB
Aleaciones refractarias								
Niobio R04210 (columbio)	....	204-210	99.6 Cb	Templado	37 (255)	53 (365)	26	80
Molibdeno	....	R03600	0.01-0.04 C					
Molibdeno, bajo en C	....	R03650	0.01 C					
Aleación de molibdeno	....	R03630	0.01-0.04 C, 0.40-0.55 Ti, 0.06-0.12 Zn					
Tantalio	....	R05200	mín. 99.8 de Ta	Templado	......	50 (345)	40	45
Tungsteno	....	R07030	mín. 99.9 de W	Templado	......	270 (1862)		
Circonio	....	R60702	4.5 Hf, 0.2 Fe + Cr, 99.2 Zi + Hf	Templado	16 (110)	36 (248)	31	77
Metales preciosos y sus aleaciones								
Oro	....	P00020	mín. 99.95 de Au	Templado	....	19 (131)	45	25
Plata	....	P07015	mín. 99.95 de Ag	Templado	8 (55)	18 (124)	54	27
Plata Sterling	....	......	7.5 Cu, 92.5 Ag	Templado	20 (138)	41 (283)	26	65
Platino	....	P04955	mín. 99.95 de Pt	Templado	....	18 (124)	38	39
Paladio	....	P03980	mín. 99.80 de Pd	Templado	....	25 (172)	27	38
Aleaciones de plomo								
Plomo químico	....	.....	mín. 99.9 de Pb	Laminado	1.9 (13)	2.5 (17)	50	5
Plomo antimonial	....	.....	90 Pb, 10 Sb	Laminado	....	4.1 (28)	47	13
Plomo teluro	....	.....	99.85 Pb, 0.04 Te, 0.06 Cu	Laminado	2.2 (15)	3 (21)	45	6
Sold. de plomo y estaño 50-50	....	L05500	50 Pb, 50Sn, máx. 0.12 de Sb	Colado	......	6.8 (47)	50	14
Aleaciones de magnesio								
Aleación forjada	AZ31B	M11311	2.5-3.5 Al, mín. 0.20 de Mn, 06-1.4 Zn	Templado	15-18 (103-124)	32 (220)	9-12	56
Aleación colada	AZ91C	M11914	8.1-9.3 Al, mín. 0.13 de Mn, 04-1.0 Zn	Como colado	11 (76)	23 (159)	....	60
Aleación colada	EZ33A	M12330	2.0-3.1 Zn, 0.5-1.0 Zr	Envejecido	14 (97)	20 (138)	2	50
Aleación forjada	HK31A	M13310	0.3 Zn, 2.5-4.0 Th, 0.4-1.0 Zr	Templado, durc al esfuerzo	24-26 (165-179)	33-34 (228-234)	4	57
Aleaciones de titanio								
Puro comercial	Gr. 1	R50250	0.20 Fe, 0.18 O	Templado	35 (241)	48 (331)	30	120
Puro comercial	Gr. 2	R50400	0.30 Fe, 0.25 O	Templado	50 (345)	63 (434)	28	200
Ti-Pd	Gr. 7	R52400	0.30 Fe, 0.25 O, 0.12-0.25 Pd	Templado	50 (345)	63 (434)	28	200
Ti-6A1-4V	Gr. 5	R56400	5.5-5.6 Al, 0.40 Fe, 0.20 O, 3.5-4.5 V	Templado	134 (924)	144 (993)	14	330
Aleación baja	Gr. 12	....	0.2-0.4 Mo, 0.6-0.9 Ni	Templado	65 (448)	75 (517)	25	
Aleaciones de cobalto								
	N-155	R30155	0.08-0.16 C, 0.75-1.25 Cb, 18.50-21.0 Co, 20.0-22.5 Cr, 1.0-2.0 Mn, 2.5-3.5 Mo, 19-21 Ni, 1.0 Si, 2.0-3.0 W					
	MP35N	R30036	0.025 C, 19-21 Cr, 1.0 Fe, 0.15 Mn, 9.0-10.5 Mo, 33 37 Ni, 0.15 Si, 1.0 Ti	Templado	60 (414)	135 (931)	70	
	Estelita 6	R30006	0.9-1.4 C, 27-31 Cr, 3 Fe, 1.0 Mn, 1.5 Mo, 3.0 Ni, 1.5 Si, 3.5-5.5 W	Como colado	....	105 (724)	1	

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.

†Propiedades usuales a la temperatura ambiente.

‡ Los valores de una sola cifra son los valores máximos, a menos que se indique lo contrario.

TABLA 23-20 Propiedades del vidrio y el sílice*

	Pirocerámica	96% de sílice	Borosilicato	Recubrimiento de vidrio
Densidad relativa, 77°F	2.60	2.18	2.23	2.56
Absorción de agua, %	0.00	0.00	0.00	
Permeabilidad a los gases	Hermético	Hermético	Hermético	
Temperatura de ablandamiento, °F (°C)	2282 (1250)	2732 (1500)	1508 (1820)	
Calor específico, 77°F Btu/(lb · °F)[J/(kg · K)]	0.185 (775)	0.178 (746)	0.186 (779)	
Calor específico medio (77-752°F)	0.230	0.224	0.233	
Conductividad térmica, temperatura media, 77°F, Btu/(ft^2 · h · °F)/in [W/(m · K)]	25.2 (3.6)	....	7.5 (1.1)	
Dilatación térmica lineal, por °F (77-572°F; (por °C), × 10^{-6}	3.2 (5.8)	0.44 (0.79)	1.8 (3.2) *	
Módulo de elasticidad, kip/in^2 (MPa) × 10^3	17.3 (119)	9.6 (66)	9.5 (66)	6-9 (40-60)
Razón de Poisson	0.245	0.17	0.20	
Módulo de ruptura kip/in^2	20 (140)	5-9 (35-63)	6-10 (42-70)	
Dureza de Knoop, 100 g	698	532	481	480
Dureza de Knoop, 500 g	619	477	442	
Fuerza de adhesión kip/in^2 (MPa)	....	....	....	5-10 (35-70)
Temperatura operacional máxima, °F (°C)	....	....	....	500 (260)
Resistencia a los choques térmicos, diferencia de temperatura, °F (°C)	....	....	....	305 (152)

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

		19–21 Ni, 1.0 Si, 2.0–3.0 W				
MP35N	R30035	0.025 C, 19–21 Cr, 1.0 Fe, 0.15 Mn, 9.0–10.5 Mo, 33-37 Ni, 0.15 Si, 1.0 Ti	Templado	60 (414)	135 (931)	70
Estelita 6	R30006	0.9–1.4 C, 27–31 Cr, 3 Fe, 1.0 Mn, 1.5 Mo, 3.0 Ni, 1.5 Si, 3.5–5.5 W	Como colado	......	105 (724)	1

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.
† Propiedades usuales a la temperatura ambiente.
‡ Los valores de una sola cifra son los valores máximos, a menos que se indique lo contrario.

los álcalis fuertes) hacen que los plásticos fenólicos sean muy aceptados para los equipos químicos. Los plásticos de furano, con carga de asbesto y vidrio tienen mucha mejor resistencia a los álcalis que las resinas fenólicas. Son más costosos que los productos fenólicos, pero ofrecen también resistencias superiores en cierto grado.

Las resinas de poliéster reforzadas con fibra de vidrio, tienen buena solidez y buena resistencia química, excepto a los álcalis. Algunos materiales especiales en esta clase, basados en el bifenol y ésteres vinílicos son más resistentes a los álcalis. El límite de temperatura para los poliésteres es de, aproximadamente, 90 a 150°C (200 a 300°F), dependiendo de las condiciones a la exposición.

Los epoxis reforzados con fibra de vidrio tienen alta resistencia al esfuerzo y al calor. La resistencia química de la resina epoxi es excelente en ácidos débiles y no oxidantes, pero no es buena contra los ácidos fuertes. La resistencia alcalina es excelente en soluciones débiles. La resistencia es baja en disolventes orgánicos como las cetonas, hidrocarburos clorados e hidrocarburos aromáticos.

Las poliimidas termofijas son una familia de polímeros resistentes al calor con propiedades aceptables hasta 260°C (500°F). No se ven afectados por ácidos diluidos, hidrocarburos aromáticos y alifáticos, ésteres, éteres y alcoholes, pero son atacados por álcalis diluidos y ácidos inorgánicos concentrados.

La resistencia química de los laminados de resina termofija reforzada con vidrio se puede afectar por cualquier partícula de vidrio expuesta en el laminado.

El asbesto fenólico, el vidrio de poliéster para uso general, el Sarán y el CAB se ven afectados adversamente por los álcalis, y los termoplásticos tienen, en general, baja resistencia a los productos orgánicos.

La falta de homogeneidad y la naturaleza de carácter desmenuzable de las estructuras del compuesto FRP, determinan que se debe cuidar el diseño mecánico, la selección del proveedor, la inspección, el embarque, la instalación y el tipo de empleo.

La FRP codifica recipientes para servicios a presiones sobre 0.1 MPA (lbf/in^2) y se deben diseñar y construir de acuerdo con la sección X de la ASME. El equipo para servicio desde el vacío total hasta una presión de 0.1 MPA (15 lbf/in^2), aunque no está actualmente cubierto por un código de diseño de la ASME, se puede diseñar o fabricar de acuerdo con el SPI-MTI Quality Assurance Practices and Procedures Report for RTP equipment.

Caucho y elastómeros El caucho y los elastómeros se emplean mucho como materiales de recubrimiento. Para cubrir las demandas de la industria química, los elaboradores de caucho mejoran constantemente los productos. Se ha desarrollado cierto número de cauchos sintéticos y aunque ninguno de ellos tiene todas las propiedades del caucho natural, son superiores en uno o más aspectos. Los cauchos sintéticos de isopreno y polibutadieno son duplicados del natural.

La capacidad del caucho natural de unirse a sí mismo y al acero lo hacen ideal para recubrir tanques; muchos de los elastómeros sintéticos, que son más resistentes químicamente que el caucho natural, presentan el inconveniente de uniones muy débiles, y por esta razón no son adecuados para recubrir tanques.

El **caucho natural** es resistente a los ácidos minerales diluidos, los álcalis y las sales, pero lo atacan los medios oxidantes, los aceites, y un sinnúmero de disolventes orgánicos. El **caucho duro** se elabora agregando 25% o más de azufre al caucho natural o sintético y, como tal, resulta duro y fuerte. El **caucho de cloropreno**, o **neopreno**, es resistente a los ataques del ozono, los rayos del sol, los aceites, la gasolina y los disolventes aromáticos o halogenados, pero es penetrado fácilmente por el agua, lo cual limita su utilización como revestimiento para recipientes. El **caucho de estireno** tiene una resistencia química similar a la del natural. El **caucho de nitrilo** se conoce por su resistencia a los aceites y los disolventes. La resistencia del **caucho de butilo** a los ácidos minerales diluidos y a los álcalis es excepcional; la resistencia a los ácidos concentrados, excepto el nítrico y el sulfúrico, es buena. Los **cauchos de silicón** que se conocen también como polisiloxanos, tienen resistencia extraordinaria a las temperaturas altas y bajas, así como también a los disolventes alifáticos, los aceites y las grasas. El **polietileno clorosulfonatado**, que se conoce como **Hypalon**, tiene resistencia extraordinaria al ozono y los agentes oxidantes con excepción del ácido sulfúrico y el nítrico fumante. La resistencia a los aceites es buena. Los **fluoroelastómeros (Viton A, Kel-F, Kalrez)** combinan una resistencia excelente a los productos químicos y a las temperaturas elevadas. El **elastómero de cloruro de polivinilo (Koroseal)** se desarrolló para superar algunas limitaciones de los cauchos naturales y sintéticos. Tiene una resistencia excelente a los ácidos minerales y a los aceites del petróleo.

Los cauchos de **cis-polibutadieno, cis-poliisopreno** y **etileno-propileno** son duplicados cercanos del caucho natural. Los cauchos más modernos de etileno-propileno (EPR) tienen una resistencia excelente al calor y a la oxidación.

Asfalto El asfalto se emplea como recubrimiento protector flexible, como membrana para un recubrimiento de ladrillos, y como cubierta con resistencia química para pisos y para recubrir caminos. El asfalto es resistente a ácidos y bases, pero es soluble en disolventes orgánicos como las cetonas, la mayor parte de los hidrocarburos clorados y los hidrocarburos aromáticos.

Carbono y grafito La resistencia química del carbono y el grafito impermeable depende hasta cierto punto del tipo de resina impregnante que se utiliza para su impermeabilización. En general, el grafito impermeable es completamente inerte a todas las condiciones, con excepción de las oxidantes más fuertes. Esta propiedad, combinada con la excelente transferencia de calor, ha hecho que el grafito y el carbono impermeables sean muy aceptados en los intercambiadores de calor, como recubrimientos refractarios y en tuberías y bombas. Una de las limitaciones de esos materiales es su baja resistencia a la tracción. Las temperaturas de umbral de oxidación son de 350°C (660°F) para el carbono y de 400°C (750°F) para el grafito.

En la fabricación de grafito impermeable se utilizan varios tipos de impregnados de resina. El impregnante estándar es una resina fenólica adecuada para el servicio con la mayor parte de los ácidos, las soluciones de sales y los compuestos orgánicos. Se recomienda un impregnante fenólico modificado para el servicio con productos químicos oxidantes y álcalis. Las resinas termoestables Furano y epoxi se utilizan también para corregir fallas estructurales. La resistencia química del grafito impermeable se controla por medio de la resina utilizada. Sin embargo, no se recomienda ningún tipo de grafito impermeable para el uso de fluorhídrico a más de 60%, nítrico a más del 20% y sulfúrico a más de 96% y en 100% para bromo, flúor y yodo.

Madera Aunque bastante inerte desde el punto de vista químico, la madera es deshidratada con facilidad, por las soluciones concentradas y, por tanto, se encoge mucho cuando se somete a la acción de esas soluciones. También se hidroliza lentamente con los ácidos y los álcalis, sobre todo cuando están calientes. En la construcción de tanques, si se produce un encogimiento suficiente para permitir que se formen cristales entre las duelas, resulta muy difícil volver a hacer el tanque hermético.

Ciertos fabricantes ofrecen madera impregnada para resistir a los ácidos, los álcalis o los efectos de las altas temperaturas.

MATERIALES PARA ALTAS Y BAJAS TEMPERATURAS

METALES PARA BAJAS TEMPERATURAS

Las propiedades de los metales a bajas temperaturas han planteado algunos problemas desacostumbrados en la fabricación de equipos criogénicos.

La mayor parte de los metales pierden su ductilidad y su resistencia a los impactos a temperaturas bajas, aunque en muchos casos aumentan la resistencia a la cedencia y la tracción conforme bajan las temperaturas.

La selección de materiales para dar servicio a bajas temperaturas es un área especializada. En general, es necesario seleccionar los materiales y los métodos de fabricación que proporcionen la tenacidad adecuada en todas las condiciones de operación. Con frecuencia se hace necesario especificar las pruebas de calificación con ranuras en forma de "V" (u otras apropiadas) para demostrar la tenacidad adecuada de los aceros al carbono y de baja aleación que operan a temperaturas mínimas.

TABLA 23-21 Resistencia química de plásticos importantes

	Polipropileno polietileno	CAB *	ABS †	PVC ‡	Sarán §	Vidrio de poliéster¶	Vidrio Epoxi	Asbestos fenólico	Fluorocarburos	Poliéster clorado (Penton)	Policarbonato
H_2SO_4 al 10%	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
H_2SO_4 al 50%	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
HCl al 10%	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
HNO_3 al 10%	Excelente	Mala	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Regular	Excelente	Excelente	Excelente
Acético al 10%	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
NaOH al 10%	Excelente	Regular	Excelente	Buena	Regular	Regular	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Excelente
NaOH al 50%	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Regular	Mala	Buena	Mala	Excelente	Excelente	Excelente
NH_4OH	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Mala	Regular	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Excelente
NaCl	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
$FeCl_3$	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
$CuSO_4$	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
NH_4NO_3	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
H_2S húmedo	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	
Cl_2 húmedo	Mala	Mala	Excelente	Buena	Mala	Mala	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	
SO_2 húmedo	Excelente	Mala	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	
Gasolina	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Benceno	Mala	Mala	Mala	Mala	Regular	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Regular
CCl_4	Mala	Mala	Mala	Regular	Regular	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Regular	Mala
Acetona	Mala	Mala	Mala	Mala	Regular	Mala	Buena	Mala	Excelente	Buena	Buena
Alcohol	Mala	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

NOTA: Las clasificaciones son para exposiciones prolongadas a temperatura ambiente [(menor de 38°C (100°F)].

* Acetato butirato de celulosa.

† Polímero de butadieno estireno acrilonitrilo.

‡ Cloruro de polivinilo, tipo I.

§ La resistencia química de las tuberías recubiertas de Sarán es superior a la del Sarán extruido, en algunos ambientes.

¶ Se refiere a los poliésteres para fines generales. Los poliésteres especiales tienen una resistencia superior, sobre todo en los álcalis.

TABLA 23-22 Gamas de propiedades características para plásticos

Termoestables[a]	Densidad relativa	Resistencia a la tracción		Módulo de elasticidad, tensión		Resistencia al impacto, Izod[b]		Temperatura de uso máxima (sin carga)		HDT a 264 lbf/in²[c]		Resistencia química[d]					
		kip	MPa	10^3 kip/in²	10^3 MPa	ft·lb	J	°F	°C	°F	°C	Resist. a la intemperie	Ácidos débiles	Ácidos fuertes	Álcalis débiles	Álcalis fuertes	Disolventes

TABLA 23-22 Gamas de propiedades características para plásticos

		Resistencia a la tracción		Módulo de elasticidad, tensión		Resistencia al impacto, Izod[b]		Temperatura de uso máxima (sin carga)		HDT a 254 lbf/in²[c]		Resistencia química[d]					
Termoestables[a]	Densidad relativa	kip	MPa	10^2kip/in²	10^2MPa	ft·lb	J	°F	°C	°F	°C	Resist. a la intemperie	Ácidos débiles	Ácidos fuertes	Álcalis débiles	Álcalis fuertes	Disolventes
Alquidálicas																	
Con carga de vidrio	2.12–2.15	4–9.5	28–66	20–28	138–193	0.6–10	0.8–14	450	230	400–500	200–260	R	A	A	A	A	A
Con carga mineral	1.60–2.30	3–9	21–62	5–30	34–207	0.3–0.5	0.4–0.7	300–450	150–230	350–500	180–260	R	R	A	A	D	A
Con carga de asbesto	1.65	4.5–7	31–48	.....	.....	0.4–0.5	0.6–0.7	450	230	315	160	R	R	S	R	S	R
Con carga de fibra sintética	1.24–2.10	4.5–7	31–48	20	138	0.5–4.5	0.7–6.1	300–430	150–220	245–430	120–220	R	R	S	R	S	A
Diglicol alquil carbonato	1.30–1.40	5–6	34–41	3.0	21	0.2–0.4	0.3–0.5	212	100	140–190	60–90	R	R	A[e]	R	R-S	R
Epóxicas (bis-A)																	
Sin carga	1.06–1.40	4–13	28–90	2.15–5.2	15–36	0.2–1.0	0.3–1.4	250–500	120–260	115–500	45–260	R	R	A	R	S	R-S
Reforzada con fibra de grafito	1.37–1.38	185–200	1280–1380	118–120	814–827	.....	.....	.....	.....	.....	.....	S	R	R	R	R	R-S
Con carga mineral	1.6 –2.0	5–15	34–103	.....	.....	0.3–0.4	0.4–0.5	300–500	150–260	250–500	120–260	S	R	R	R	R	R-S
Con carga de vidrio	1.7 –2.0	10–30	69–207	30	207	10–30	14–41	300–500	150–260	250–500	120–260	S	R	R-S	R	R	R-S
Epóxicas (novolac) sin carga	1.12–1.24	5–11	34–76	2.15–5.2	15–36	0.3–0.7	0.4–0.9	400–500	200–260	450–500	230–260	R	R	R	R	R	R
Epóxicas (cicloalifáticos): sin carga	1.12–1.18	10–17.5	69–121	5–7	34–48	.....	.....	480–550	250–290	500–550	260–290	R	R	R-A	R	R-A	R
Fenólicos																	
Con carga de aserrín	1.34–1.45	5–9	34–62	8–17	55–117	0.2–0.6	0.3–0.8	300–350	150–180	300–370	150–190	S	R-S	S-D	S-D	A	R-S
Con carga de asbesto	1.45–2.00	4.5–7.5	31–52	10–30	69–207	0.2–0.4	0.3–0.5	350–500	180–260	300–500	150–260	S	R-S	S-D	S-D	A	R-S
Con carga de mica	1.65–1.92	5.5–7	38–48	25–50	172–345	0.3–0.4	0.4–0.5	250–300	120–150	300–350	150–180	S	R-S	S-D	S-D	A	R-S
Con carga de vidrio	1.69–1.95	5–18	34–124	19–33	131–228	0.3–18	0.4–24	350–550	180–290	300–600	150–320	S	R-S	S-D	S-D	A	R-S
Con carga de tejidos	1.36–1.43	3–9	21–62	9–14	62–97	0.8–8	1.1–11	220–250	100–120	250–330	120–170	S	R-S	S-D	S-D	A	R-S
Ftalatos de dialilo																	
Con carga de vidrio	1.61–1.78	6–11	41–76	14–22	97–152	0.4–15	0.5–20	300–400	150–200	330–540	165–280	R	R	S	R-S	S	R
Con carga mineral	1.65–1.68	5–9	34–62	12–22	83–152	0.3–0.5	0.4–1	300–400	150–200	320–540	160–280	R	R	S	R-S	S	R
Con carga de asbesto	1.55–1.65	7–8	48–55	12–22	83–152	0.4–0.5	0.5–0.7	300–400	150–200	320–540	160–280	R	R	S	R-S	S	R
Melaminas																	
Con carga de celulosa	1.45–1.52	5–9	34–62	11	76	0.2–0.4	0.3–0.5	250	120	270	130	S	R-S	D	R	D	R
Con carga de borra	1.50–1.55	7–9	48–62	.....	.....	0.4–0.5	0.5–0.7	250	120	270	130	S	R-S	D	R	D	R-S
Con carga de asbesto	1.70–2.0	5–7	34–48	20	138	0.3–0.4	0.4–0.5	250–400	120–200	265	130	S	R-S	D	S	S	R
Con carga de tejido	1.5	8–11	55–76	14–16	97–110	0.6–1.0	0.8–1.4	250	120	310	150	S	R	D	R	A	R-S
Con carga de vidrio	1.8 –2.0	5–10	34–69	24	165	0.6–18	0.8–24	300–400	150–200	400	200	S	R	D	R	R-S	R
Polibutadienos																	
Vinilo muy alto (sin carga)	1.00	8	55	2	14	1.1	1.5	500	260	.....	.....	S	R	R	R	R	R
Poliésteres																	
Con carga de vidrio BMC	1.7 –2.3	4–10	28–69	16–25	110–172	1.5–16	2.0–22	300–350	150–180	400–450	200–230	R-E	R-A	S-A	S-A	S-D	A-D
Con carga de vidrio SMC	1.7 –2.1	8–20	55–138	16–25	110–172	8–22	11–30	300–350	150–180	400–450	200–230	R-E	R-A	S-A	S-A	S-D	A-D
Reforzado con tela de vidrio	1.3 –2.1	25–50	172–345	19–45	131–310	5–30	7–41	300–350	150–180	400–450	200–230	R-E	R-A	S-A	S-A	S-D	A-D
Silicones																	
Con carga de vidrio	1.7 –2.0	4–6.5	28–45	10–15	69–103	3–15	4–20	600	320	600	320	R-S	R-S	R-S	S	S-A	R-A
Con carga mineral	1.8 –2.8	4–6	28–41	13–18	90–124	0.3–0.4	0.4–0.5	600	320	600	320	R-S	R-S	R-S	S	S-A	R-A
Ureas																	
Con carga de celulosa	1.47–1.52	5.5–13	38–90	10–15	69–103	0.2–0.4	0.3–0.5	170	80	260–290	130–140	S	R-S	A-D	S-A	D	R-S
Uretanos																	
Sin carga	1.1 –1.5	0.2–10	1–69	1 –10	7–69	5–NB	7	129–250	90–120	.....	.....	R-S	S	A	S	S-A	R-S

TABLA 23-22 Gamas de propiedades características para plásticos *(Continuación)*

Termoplásticos	Densidad relativa	Resistencia a la tracción kip/in²	MPa	Módulo de elasticidad, tensión 10^2kip/in²	10^3MPa	Resistencia al impacto Izod[b] ft·lb	J	Temperatura de uso máxima (sin carga) °F	°C	HDT a 66 lbf/in² °F	°C	HDT a 264 lbf/in² °F	°C	Resistencia química[d] Resistencia a la intemperie	Ácido débil	Ácido fuerte	Álcali débil	Álcali fuerte	Disolventes
ABS																			
GP	1.05–1.07	5.9	41	3.1	21	6	8	160–200	70–90	210–225	100–110	190–206	90–95	R-E	R	A[e]	R	R	A/R
Alto impacto	1.01–1.06	4.8	33	2.4	17	7.5	10	140–210	60–100	210–225	100–110	188–211	85–100	R-E	R	A[f]	R	R	A/R
Resistente al calor	1.06–1.08	7.4	51	3.9	27	2.2	3.0	190–230	90–110	225–252	110–120	226–240	110–115	R-E	R	A[f]	R	R	A/R
Trans.	1.07	5.6	39	2.9	20	5.3	7.1	130	55	180	80	165	75	R-E	R	A[f]	R	R	A/R
	1.20	6.0	41	3.2	22	2.5	3.4	130–180	55–80	210–220	100–105	195	90	R-E	R	A[e]	R	R	A/R
Acetales																			
Homopolímeros	1.42	10	69	5.2	36	1.4	1.9	195	90	338	170	255	125	R	R	A	R	A-D	R
Copolímeros	1.41	8.8	61	4.1	28	1.2–1.6	1.6–2.2	212	100	316	160	230	110	R	R	A	R	R	R
Acrílicos																			
GP	1.11–1.19	5.6–11.0	39–76	2.25–4.65	16–32	0.3–2.3	0.4–3.1	130–230	55–110	175–225	80–110	165–210	75–100	R	R	A[e]	R	A	A/R
Alto impacto	1.12–1.16	5.8–8.0	40–55	2.3–3.3	16–23	0.8–2.3	1.1–3.1	140–195	60–90	180–205	80–95	165–190	75–90	R	R	A[e]	R	R	A/R
	1.21–1.28	8.0–12.5	55–86	3.5–4.8	24–33	0.3–0.4	0.4–0.5	125–200	50–90	170–200	75–95	155–205	70–95	R	R	A[e]	R	A	A/R
Fundido	1.18–1.28	9.0–12.5	62–86	3.7–5.0	26–34	0.4–1.5	0.5–2.0	140–200	60–90	165–235	75–115	160–215	70–100	R	R	A[e]	R	A	A/R
Multipolímero	1.09–1.14	6–8	41–55	3.1–4.3	21–30	1–3	1–4	165–175	75–80	....	....	185–195	85–90	E	R	A[e]	H	S	A[f]
Celulósicos																			
Acetato	1.23–1.34	3.0–8.0	21–55	1.05–2.55	7–18	1.1–6.8	1.5–9	140–220	60–105	120–209	50–100	111–195	45–90	S	S	D	S	D	D-S
Butirato	1.15–1.22	3.0–6.9	21–48	0.7–1.8	5–12	3.0–10.0	4–14	140–220	60–105	130–227	55–110	113–202	45–95	S	S	D	S	D	D-S
Celulosa E	1.10–1.17	3–8	21–55	0.5–3.5	3–24	1.7–7.0	2.3–9.5	115–185	45–85	....	....	115–190	45–90	S	S	D	R	S	D
Nitrato	1.35–1.40	7–8	48–55	1.9–2.2	13–15	5–7	7–9	140	60	....	....	140–160	60–70	E	S	D	S	D	D
Propionato	1.19–1.22	4.0–6.5	28–45	1.1–1.8	8–12	1.7–9.4	2.3–13	155–220	70–105	147–250	65–120	111–228	45–110	S	S	D	S	D	D-S
Cloro poliéster																			
Copolímero de propileno	0.91	4	28	1.0–1.7	7–12	1.1	1.5	190–240	90–115	185–230	85–110	115–140	45–60	E	R	A[e]	R	R	R
CPVC rígido	1.49–1.58	7.5–9.0	52–62	3.6–4.7	25–32	1.0–5.6	1.4–7.6	230	110	215–245	100–120	200–235	95–115	R	R	R	R	R	R
Etileno	1.4	5.4	37	1.5	10	0.4	0.5	290	140	285	140	....	....	R-S	R	A[e]	R	R	R
Copolímeros																			
EEA	0.93	2.0	14	0.05	0.3	NB	....	190	90	....	....	....	....	S	R	A[e]	R	R	A-D
EVA	0.94	3.6	25	0.02–0.12	0.14–0.8	NB	....	....	....	140–147	60–65	93	35	S	R	A	R	R	A-D
Fluoropolímeros																			
FEP	2.14–2.17	2.5–3.9	17–27	0.5–0.7	3–5	NB	....	400	208	158	70	....	....	R	R	R	R	R	R
PTFE	2.1–2.3	1.4	7–28	0.38–0.65	2.6–4.5	2.5–4.0	3.4–5.4	550	290	250	120	....	....	R	R	R	R	R	R
CTFE	2.10–2.15	4.6–5.7	32–39	1.8–2.0	12–14	3.5–3.6	4.7–4.9	350–390	180–200	258	125	....	....	R	R	R	R	R	S[g]
PVF_2	1.77	7.2	50	1.7	12	3.8	5.2	300	150	300	150	195	90	S	R	A[h]	R	R	R
ETFE y ECTFE	1.68–1.70	6.5–7.0	45–48	2–2.5	14–17	NB	....	300	150	220	105	160	70	R	R	R	R	R	
Ionómero	0.94–0.95	3.4–4.5	23–31	0.3–0.7	2–5	6-NB	8	160–180	70–80	110	45	100–120	40–50	E	A	A[e]	R	R	R
Materiales basados en óxido de fenileno	1.06–1.10	7.8–9.6	54–66	3.5–3.8	24–26	5.0	68	175–220	80–105	230–280	110–140	212–265	100–130	R	R	R	R	R	R-A
Metilpenteno	0.83	3.3–3.6	23–25	1.3–1.9	10–13	0.95–3.8	1.3–5.2	275	135	....	....	....	....	E	R	A[h]	R	R	A
Nylons																			
6/6	1.13–1.15	9–12	62–83	3.85	27	2.0	27	180–300	80–150	360–470	180–240	150–220	165–105	R	R	A	R	R	R-D[f]
6	1.14	12.5	86	....	....	1.2	1.6	180–250	80–170	300–365	150–185	140–155	60–70	R	R	A	R	R	R-A[i]
6/10	1.07	7.1	49	2.8	19	1.6	2.2	180	80	300	150	....	....	R	R	A	R	R	R-A[i]
8	1.09	3.9	27			>16	>22							R	R	A	R	R	R-A[i]
12	1.01	6.5–8.5	45–59	1.7–2.1	12–14	1.2–4.2	1.6–5.7	175–260	80–125	....	....	120–130	50–55	R	R	A	R	R	R-A[i]
Copolímeros	1.08–	7.5–11.0	52–76	....	....	1.5–19	2–26	180–250	80–120	....	....	130–350	55–180	R	R	A	R	R	R-A[i]

PTFE	2.1–2.3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	....	....	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
CTFE	2.10–2.15	4.6–5.7	32–39	1.8–2.0	12–14	3.5–3.6	4.7–4.9	350–390	180–200	258	125	....	....	R	R	R	R	R	S[g]
PVF_2	1.77	7.2	50	1.7	12	3.8	5.2	300	150	300	150	195	90	S	R	A[h]	R	R	R
ETFE y ECTFE	1.68–1.70	6.5–7.0	45–48	2–2.5	14–17	NB	....	300	150	220	105	160	70	R	R	R	R	R	
Ionómero	0.94–0.95	3.4–4.5	23–31	0.3–0.7	2–5	6-NB	8	160–180	70–80	110	45	100–120	40–50	E	A	A[e]	R	R	R
Materiales basados en óxido de fenileno	1.06–1.10	7.8–9.6	54–66	3.5–3.8	24–26	5.0	68	175–220	80–105	230–280	110–140	212–265	100–130	R	R	R	R	R	R-A
Metilpenteno	0.83	3.3–3.6	23–25	1.3–1.9	10–13	0.95–3.8	1.3–5.2	275	135	....	....	....	....	E	R	A[h]	R	R	A
Nylons																			
6/6	1.13–1.15	9–12	62–83	3.85	27	2.0	27	180–300	80–150	360–470	180–240	150–220	165–105	R	R	A	R	R	R-D[f]
6	1.14	12.5	86	....	....	1.2	1.6	180–250	80–170	300–365	150–185	140–155	60–70	R	R	A	R	R	R-A[i]
6/10	1.07	7.1	49	2.8	19	1.6	2.2	180	80	300	150	....	....	R	R	A	R	R	R-A[i]
8	1.09	3.9	27			>16	>22							R	R	A	R	R	R-A[i]
12	1.01	6.5–8.5	45–59	1.7–2.1	12–14	1.2–4.2	1.6–5.7	175–260	80–125	....	....	120–130	50–55	R	R	A	R	R	R-A[i]
Copolímeros	1.08–1.14	7.5–11.0	52–76	....	....	1.5–19	2–26	180–250	80–120	....	....	130–350	55–180	R	R	A	R	R	R-A[i]
PC-ABS	1.14	8.2	57	3.7	26	10	14	220	105	235	115	220	105	R-E	R	A[e]	R	S	A
Poliaril éter	1.14	7.5	52	3.2	22	10	14	250	120	320	100	300	150	E	R	R	R	R	A
Poliaril sulfona	1.36	13	90	3.7	26	2	2.7	500	260	....	....	525	275	Obscur.	R	R	R	R	R
Polibutileno	0.910	3.8	26	0.26	1.8	NB		225	105	215	100	130	55	E	R	A[e]	R	R	
Policarbonato	1.2	9	62	3.45	24	12–16	16–22	250	120	270–290	130–145	265–285	130–140	R	R	A[e]	A	A	A
Poliésteres																			
PET	1.37	10.4	72	....	....	0.8	1.1	175	80	240	115	185	85	R	R	A[e]	R	A	R-A[f]
PBT	1.31	8.0–8.2	55–57	3.6	25	1.2–1.3	1.6–1.8	280	140	310	155	130	55	R	R	R	R	A	R
PTMT	1.31	8.2	57	....	....	1.0	1.4	270	130	302	150	122	50	R	R	R	R	A	R
Copolímeros	1.2	7.3	50	....	....	1.0	1.4					154	70						
Poliestirenos																			
GP	1.04–1.07	6.0–7.3	41–50	4.5	31	0.3	0.4	150–170	65–80	....	....	180–220	80–105	S	R	A[e]	R	R	D
Alto impacto	1.04–1.07	2.8–4.6	20–32	2.9 4.0	20–28	0.7–1.0	0.9–1.4	140–175	60–80	....	....	175–210	80–100	S	R	A[e]	R	R	D
Polietilenos																			
LD	0.91–0.93	0.9–2.5	6–17	0.20–0.27	1.4–1.9	NB	....	180–212	80–100	100–120	40–50	90–105	30–40	E	R	A[e]	R	R	R
HD	0.95–0.96	2.9–5.4	20–37	....	....	0.4–14	0.5–19	175–250	80–120	140–190	60–90	110–130	45–55	E	R	R-A[e]	R	R	R
HMW	0.945	2.5	17	1	7	NB	....	....	....	155–180	70–80	105–180	40–80	E	R	A[e]	R	R	R
Poliimida	1.43	5–7.5	34–52	5.4	37	5–7	7–9	500	260	....	....	680	360		R	R	A	A	R
Polipropilenos																			
GP	0.90–0.91	4.8–5.5	33–38	1.6–2.2	11–15	0.4–2.2	0.5–3.0	225–300	105–150	200–230	95–110	125–140	50–60	E	R	A[e]	R	R	R
Alto impacto	0.90–0.91	3–5	21–34	1.3	9	1.5–12	2–16	200–250	95–120	160–200	70–95	120–135	50–60	E	R	A[e]	R	R	A
Polisulfona	1.24	10.2	70	3.6	25	1.2	1.6	300	150	360	180	345	175	S	R	R	R	R	R-A
Poliuretanos	1.11–1.25	4.5–8.4	31–58	0.1–3.5	0.7–24	NB	....	190	90	....	...	....	....	R-S	S-D	S-D	S-D	S-D	R
PVC-ABS	1.10–1.21	2.6–6.0	18–41	0.8–3.4	6–23	10–15	14–20	....	....	....	....	....	....	S	R	R-S	R	R	R-D
PVC-acrílico	1.30–1.35	5.5–6.5	38–45	2.75–3.35	19–23	15	20	....	....	180	80	170	80	R	R	S	R	R	A
SAN	1.08	10–12	69–83	5.0–5.6	34–39	0.4–0.5	0.5–0.7	140–200	60–95	....	....	190–220	90–105	S-E	R	A	R	R	A
Sulfuro de polifenileno	1.34	10	69	4.8	33	0.3	0.4	500	260	....	....	278	135	R	R	A[e]	R	R	R
Vinilo, flexible	1.2–1.7	1–4	7–28	....	....	0.5–20	0.7–27	140–175	60–80	....	....	....	....	S	R	R-S	R	R	R-A
Vinilo, rígido	1.3–1.5	5–8	34–55	3– 5	21–34	0.5–20	0.7–27	150–175	65–80	135–180	60–80	130–175	55–80	R	R	R-S	R	R	R-A

Fuente: *Plastics Engineering Handbook*, 4th ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1976. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers*. Para convertir megapascales en libras-fuerza por pulgada cuadrada, multiplíquese por 145.04.

[a] Todos los valores se consignan a temperatura ambiente, a menos que se indique otra cosa.

[b] Muestras con muescas.

[c] Temperatura de deflexión por calor.

[d] Ac = ácido, y Al = álcali; R = resistente; A = afín; S = efectos ligeros. E = frágil. D = descomposición.

[e] Por ácidos oxidantes.

[f] Por cetonas, ésteres e hidrocarburos aromáticos y clorados.

[g] Disolventes halogenados causan hinchazón

[h] Por ácido sulfúrico fumante.

[i] Se disuelve en fenoles y ácido fórmico.

TABLA 23-23 Resistencia química de recubrimientos para servicio por inmersión (a temperatura ambiente)

	Asfalto sin modificar	Alquitrán de hulla		Epoxi de alquitrán de hulla	Uretanos de alquitrán de hulla	Epoxi: horneado con fenólica	Epoxi: curado con amina	Epoxi éster	Alcohol furfurílico	Fenólicos horneados	Poliésteres (insaturados)	Cloroacetatos de polivinilo	Éster vinílico	Uretanos		Cloruro de vinilideno	Cauchos clorados
		Aplic. en caliente	Aplic. en frío											Secados al aire	Horneados		
Ácidos																	
Sulfúrico al 10%	R	LR	NR	R	R	R	R	LR	R	R	R	R	R	LR	LR	R	R
Sulfúrico al 80%	..	NR	NR	..	NR	NR	NR	NR	LR	NR	R	NR	R	NR	LR	LR	R
Clorhídrico al 10%	R	LR	NR	LR	LR	R	R	LR	R	R	R	R	R	LR	LR	R	R
Clorhídrico al 35%	R	NR	NR	..	..	NR	NR	NR	R	R	R	LR	R	LR	LR	R	R
Nítrico al 10%	NR	LR	NR	..	..	LR	NR	NR	NR	NR	R	R	R	LR	LR	R	R
Nítrico al 50%	NR	NR	NR	..	..	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	..	NR	NR	LR	NR
Acético al 100%		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	LR	LR	NR	NR	LR	NR	NR	NR	NR
Agua																	
Destilada	R	R	R	R	LR	R	R	R	R	R	R	R	R	LR	LR		R
Salada	R	R	R	R	LR	R	R	R	R	R	R	R	R	LR	LR	R	R
Álcalis																	
Hidróxido de sodio al 10%	R	R	LR	R	R	R	R	NR	R	NR	R	R	R	LR	LR	LR	R
Hidróxido de sodio al 70%	..	NR	NR	..	LR	R	R	NR	LR	NR	NR	LR	R	LR	LR	NR	R
Hidróxido de amonio al 10%	R	R	LR	R	R	R	LR	LR	R	NR	R	R	R	LR	R	NR	R
Carbonato de sodio al 5%	R	R	R	.	..	R	..	..	..		..	R	R	R	R	R	R
Gases																	
Cloro	R	NR	NR	LR	NR	LR	LR	LR	NR	NR	R	LR	R	LR	R	LR	R
Amoniaco	..	LR	LR	NR	NR	LR	LR	R	R	NR	NR	LR	R	LR	R	NR	NR
Sulfuro de hidrógeno	..	R	R	R	..	R	R	..	R	R	..	LR	R	R	R	R	R
Orgánicos																	
Alcoholes	R	LR	LR	NR	NR	R	R	LR	R	R	R	R	R	NR	R	R	LR
Hidrocarburos alifáticos	NR	LR	LR	LR	LR	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	LR
Hidrocarburos aromáticos	NR	NR	NR	NR	LR	R	R	R	R	R	R	NR	LR	R	R	LR	NR
Cetonas	NR	NR	NR	NR	NR	LR	LR	NR	LR	R	NR	NR	NR	NR	R	NR	NR
Éteres	NR	NR	NR	..	..	LR	LR	NR	LR	R	..	NR	NR	R	R	NR	NR
Ésteres	NR	NR	NR	NR	NR	LR	LR	NR	R	R	LR	NR	LR	NR	R	NR	NR
Hidrocarburos clorados	NR	NR	NR	NR	LR	LR	LR	NR	LR	R	NR	LR	LR	LR	R	LR	NR
Temperatura máxima (en condiciones secas), °F	150	...	...	200	200	250	250	250	300	250–300	...	160	350	...	...	...	160
Temperatura máxima (en condiciones húmedas), °F	...	120	120	150	150	150	150	150	190	160–250	250	150	210	...	...	150	140

FUENTE: NACE TPC-2, Recubrimientos y revestimientos para servicio por inmersión (*Coatings and Linings for Immersion Service*). *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

NOTA: Los datos de resistencia química se dan solamente para recubrimientos. Los recubrimientos delgados no se recomiendan para sustratos como el acero al carbono, porque se corroen rápidamente (es decir, >20 mils/año) en el ambiente de prueba. R = recomendado; LR = recomendación limitada; NR = no se recomienda.

TABLA 23-24 Propiedades de recubrimientos para servicio a la intemperie

	Propiedades físicas	Resistencia al agua	Resistencia a ácidos	Resistencia a álcalis	Resistencia a disolventes	Resistencia a la temperatura	Resistencia a la intemperie	Segundo recubrimiento
Alquidálica								
Alquidálica de bajo contenido de aceite	Duro	Regular	Regular	Mala	Regular	Buena	Regular	Fácil
Alquidálica de alto contenido de aceite	Flexible	Regular	Mala	Mala	Mala	Buena	Buena	Fácil
[illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	La mejor del grupo	Muy buena	Regular
[illegible]							[illegible]	[illegible]

TABLA 23-24 Propiedades de recubrimientos para servicio a la intemperie

	Propiedades físicas	Resistencia al agua	Resistencia a ácidos	Resistencia a álcalis	Resistencia a disolventes	Resistencia a la temperatura	Resistencia a la intemperie	Segundo recubrimiento
Alquidálica								
Alquidálica de bajo contenido de aceite	Duro	Regular	Regular	Mala	Regular	Buena	Regular	Fácil
Alquidálica de alto contenido de aceite	Flexible	Regular	Mala	Mala	Mala	Buena	Buena	Fácil
Alquido silicón	Tenaz	Buena	Regular	Mala	Regular	La mejor del grupo	Muy buena	Regular
Alquidálica vinilo	Tenaz	Buena	La mejor del grupo	Mala	Regular	Regular	Muy buena	Difícil
Vinilo								
Copolímeros de acetato de cloruro polivinilo	Tenaz	Muy buena	Excelente	Excelente	(hidrocarburos alifáticos, buena; hidrocarburos aromáticos, mala)	Regular, 150°F	Muy buena	Fácil
Copolímeros vinil acrílicos	Tenaz	Buena	Muy buena	Muy buena	(Alifálicos, buena; aromáticos, mala)	Regular, 150°F	Excelente	Fácil
Caucho clorado								
Modificado con resina	Duro	Muy buena	Muy buena	Muy buena	(Alifáticos, buena; aromáticos, mala)	Regular	Buena	Fácil
Modificado con alquidálico	Tenaz	Buena	Regular	Regular	(Alifáticos, buena; aromáticos, mala)	Regular	Muy buena	Fácil
Base de agua								
Acetato de polivinilo	Resistente a raspones	Mala	Mala	Mala	Mala	Regular	Muy buena	Fácil
Polímeros acrílicos	Resistente a raspones	Mala	Mala	Mala	Mala	Regular	Excelente	Fácil
Epoxi	Tenaz	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Regular	Difícil
Epóxica								
Epoxiamina	Dura	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	Regular; se blanquea	Difícil
Epoxi poliamida	Tenaz	Muy buena	Regular	Excelente	Regular	Buena	Buena; se blanquea	Difícil
Epoxi de alquitrán de hulla	Duro	Excelente	Buena	Buena	Mala	Buena	Mala	Difícil
Epoxiéster	Flexible	Buena	Regular	Mala	Regular	Buena	Buena; se blanquea	Razonable
Poliuretano								
Barniz de poliuretano de secado al aire	Muy tenaz	Regular	Regular	Regular	Regular	Buena	Se amarillea	Requiere cuidado
Poliuretano con carga de dos reactivos	Tenaz; Duro	Buena	Regular	Regular	Buena	Buena	Algo amarillento y se blanquea	Difícil
Poliuretano reactivo a la humedad	Muy tenaz, resistente a la abrasión	Regular	Regular	Regular	Buena	Buena	Se decolora en la luz; amarillea en la sombra	Difícil
Poliuretano que no se amarillea	Regularmente duro a ahulado	Buena	Regular	Regular	Buena	Buena	Muy buena	Difícil
Zinc inorgánico								
Base de agua (silicato de sodio o potasio)	Tenaz; resistente a la abrasión, excelente ligante químico	Buena	Mala	Mala	Excelente	Excelente	Excelente, las variaciones climatológicas no lo afectan	Fácil
Base orgánica (silicato de etilo)	Tenaz; duro; excelente ligante	Buena	Mala	Mala	Buena	Excelente	Excelente	Fácil

FUENTE: F. L. LaQue, *Marine Corrosion: Causes and Prevention*, Wiley, New York, 1975, pp. 302-305. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

TABLA 23-25 Propiedades físicas usuales de los recubrimientos superficiales para concreto

		Poliéster		Epoxi		
	Concreto	Isoftálico	Bisfenol	Poliamida	Amina	Uretano*
Resistencia a la tracción (ASTM C307), lbf/in^2 MPa	200-400 1.4-2.8	1200-2500 8.3-17	1200-2500 8.3-17	600-4000 4.0-28	1200-2500 8.3-17	200-1200 1.4-8.3
Coeficiente de expansión térmica (ASTM C531)						
Máxima in/(in · °F)	6.5×10^6	20×10^6	20×10^6	40×10^6	40×10^6	†
Máxima mm/(mm · °C)	11.7×10^6	36×10^6	36×10^6	72×10^6	72×10^6	
Resistencia a la compresión, (ASTM C579), lbf/in^2	3 500	10 000	10 000	4000	6000	†
MPa	24	70	70	28	42	
Resistencia a la abrasión, Aparato de abrasión de Taber—pérdida de peso en mg, carga de 1000 g/1000 ciclos	....	15-27	15-27	15-27	15-27	†
Encogimiento, ASTM C531, %	....	2-4	2-4	0.25-0.75	0.25-0.75	0-2
Vida útil, mín	....	15-45	15-45	30-90	30-90	15-60
Limitaciones de tránsito, después de horas de aplicación	Ligero	16	16	24	24	24
	Pesado	36	36	48	48	48
	Listas para usarse	48	48	72	72	72
Características de adhesión ‡	....	Mala	Regular	Excelente	Buena	Regular
Resistencia a la flexión (ASTM C580), lbf/in^2	....	1500	1500	1000	1500	†
MPa	....	10	10	7	10	

FUENTE: NACE RP-03-76, *Monolithic Organic Corrosion Resistant Floor Surfacing,* 1976. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

NOTA: Todos los valores físicos dependen en gran medida del refuerzo. Los valores consignados son para temperaturas ambientales.

* El tipo de uretano utilizado es uno de los tres siguientes: (1) Tipo II, curado con humedad; (2) Tipo IV, empacado con dos catalizadores; o (3) Tipo V, empacado con dos polioles. (Ref. ASTM C16.)

† Estos uretanos no se muestran debido a las grandes diferencias en las propiedades físicas que dependen de las formulaciones. Las características de adhesión deberán relacionarse con los datos obtenidos de pruebas reales. Cualquier sistema que presente falla en el concreto cuando se prueba la adhesión superficial deberá calificarse de excelente, y se da una calificación decreciente a sistemas que muestren falla en la cohesión o adhesión por abajo de la falla del propio concreto.

‡ Adhesión al concreto: para mejorar la adhesión se recomienda el uso de primarios bajo los poliésteres y los uretanos.

Aceros inoxidables Los aceros al cromo-níquel son adecuados para servicio a temperaturas tan bajas como −250°C (−425°F). El tipo 304 es el más utilizado. El costo original del acero inoxidable puede ser más alto que el de otro metal; pero la facilidad de fabricación (sin tratamiento térmico) y la soldadura, combinadas con la alta resistencia, contrarrestan el costo inicial más alto. La sensibilización o la formación de carburos de cromo se pueden producir en varios aceros inoxidables durante la soldadura y esto afecta la resistencia a los impactos; sin embargo, las pruebas han demostrado que las propiedades de impacto de los tipos 304 y 304L no son afectadas considerablemente por la sensibilización, mientras que las propiedades del acero 302 son dañadas a −185°C (−300°F).

Acero al níquel El acero de bajo contenido de carbono y 9% de níquel es una aleación ferrítica desarrollada para utilizarse en equipos criogénicos que funcionan hasta a −195°C (−320°F). Las especificaciones ASTM A 300 y A 353 cubren el acero de bajo contenido de carbono y 9% de níquel (A 300 es la especificación básica para los aceros ferríticos de bajas temperaturas). Los refinamientos en la soldadura y la eliminación (aprobada en el Código de la ASME) de los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, hacen que el acero al 9% sea competitivo con muchos materiales de bajo costo que se emplean a bajas temperaturas.

Aluminio Las aleaciones de aluminio tienen una capacidad desacostumbrada para mantener la fuerza y la resistencia a los choques a temperaturas de hasta −250°C (−425°F). La buena resistencia a la corrosión y el costo relativamente bajo hacen que estas aleaciones sean muy aceptadas para equipos de bajas temperaturas. Para la mayor parte de las construcciones soldadas se emplean mucho las aleaciones de aluminio de la serie 5000. Son los materiales de aluminio-magnesio y aluminio-manganeso.

Cobre y sus aleaciones Con pocas excepciones, la resistencia a la tracción del cobre y sus aleaciones aumenta considerablemente al disminuir la temperatura; sin embargo, la baja resistencia estructural del cobre resulta un problema cuando se construyen equipos en gran escala. Por lo tanto, se tienen que utilizar aleaciones. Una de las más apropiadas para bajas temperaturas es el bronce de silicio. La aleación se puede utilizar con seguridad hasta −195°C (−320°F).

TABLA 23-26 Resistencia química de los cauchos

Tipo de caucho	Características
Butadieno-estireno	Para fines generales, mala resistencia a los hidrocarburos, los aceites y los agentes oxidantes
Butilo	Para fines generales, relativamente impermeable al aire; mala resistencia a los hidrocarburos y los aceites
cis-polibutadieno	Para finales generales; mala resistencia a los hidrocarburos, los aceites y los agentes oxidantes
cis-poliisopreno	Para fines generales; mala resistencia a los hidrocarburos, los aceites y los agentes oxidantes
Cloropreno	Buena resistencia a los disolventes alifáticos; mala resistencia a hidrocarburos aromáticos y muchos combustibles
Estireno	Semejante al butadieno-estireno
Etileno-propileno	Excelente resistencia al calor y la oxidación
Fluorado	Excelente resistencia a las altas temperaturas, los ácidos oxidantes y la oxidación; buena resistencia a los combustibles que contienen hasta 30% de aromáticos
Natural	Para fines generales, mala resistencia a los hidrocarburos, los aceites y los agentes oxidantes
Nitrilo (butadieno-acrilonitrilo)	Excelente resistencia a los aceites; pero no es resistente a los agentes oxidantes fuertes; la resistencia a los aceites es proporcional al contenido de acrilonitrilo
Polietileno clorosulfonado	Excelente resistencia a la oxidación, los productos químicos y el calor; mala resistencia a los aceites aromáticos y la mayor parte de los combustibles
Polisulfuro	Buena resistencia a los disolventes aromáticos; impermeabilidad desacostumbradamente alta a los gases; mala estabilidad a la compresión y mala resistencia a los agentes oxidantes
Silicones	Excelente resistencia sobre una gama desacostumbradamentes elevada de temperaturas [−100 a 260°C (−150 a + 500°F); regular resistencia a los aceites; mala resistencia a los aceites aromáticos, los combustibles, el vapor a alta presión y la abrasión

TABLA 23-27 Propiedades de los elastómeros

Propiedad	NR Caucho natural (cis- poliiso-preno)	SBR Butadieno estireno (GR-S)	IR sintético (poliiso-preno)	COX Butadieno acrilonitrilo (nitrilo)	CR Cloropreno (neopreno)	ITR Butil (isobutileno isopreno)	BR Polibuta-dieno	T Polisulfuro	Silicón (Polisilo-xano)
Propiedades físicas									
Densidad relativa (ASTM D 792)	0.93	0.91	0.93	0.98	1.25	0.90	0.91	1.35	1.1-1.6
Conductividad térmica Btu/[(h·ft2)(°F/ft)] (ASTM C 177)	0.082	0.143	0.082	0.143	0.112	0.053	. . . . .	. . . . .	0.13
Coeficiente de expansión térmica (cúbica) 10^{-5}°F (ASTM D 696)	37	37	. . . .	39	34	32	37.5	. . . . .	45
Aislamiento eléctrico	Buena	Buena	Buena	Regular	Regular	Buena	Buena	Regular	Excelente
Resistencia a la llama	Mala	Mala	Mala	Mala	Buena	Mala	Mala	Mala	Buena
Temperatura mínima de servicio recomendada, °F	−60	−60	−60	−60	−40	−50	−150	−60	−178
Temperatura máxima de servicio recomendada, °F	180	180	180	300	240	300	200	250	600
Propiedades mecánicas									
Resistencia a la tracción, lbf/in^2									
Goma pura (ASTM D 412)	2500-3500	200-300	2500-3500	500-900	3000-4000	2500-3000	200-1000	250-400	600-1300
Negra (ASTM D 412)	3500-4500	2500-3500	3500-4500	3000-4500	3000-4000	2500-3000	2000-3000	>1000	
Elongación, %									
Goma pura (ASTM D 412)	750-850	400-600		300-700	800-900	750-950	400-1000	450-650	100-500
Negra (ASTM D 412)	550-650	500-600	300-700	300-650	500-600	650-850	450-600	150-450	
Dureza (durómetro)	A30-90	A40-90	A40-80	A40-95	A20-95	A40-90	A40-90	A40-85	A30-90
Reaglutinación									
En frío	Excelente	Buena	Excelente	Buena	Muy buena	Mala	Excelente	Buena	Muy buena
En caliente	Excelente	Buena	Excelente	Buena	Muy buena	Muy buena	Excelente	Buena	Muy buena
Resistencia al desgarre	Excelente	Regular	Excelente	Buena	De regular a buena	Buena	Regular	Mala	Regular
Resistencia a la abrasión	Excelente	De buena a excelente	Excelente	De buena a excelente	Buena	De buena a excelente	Excelente	Mala	Mala
Resistencia química									
Envejecimiento a la luz del sol	Mala	Mala	Regular	Mala	Muy buena	Muy buena	Mala	Muy buena	Excelente
Oxidación	Buena	Buena	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Muy buena	Excelente
Envejecimiento por calor	Buena	Muy buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Regular	Excelente
Disolventes									
Hidrocarburos alifáticos	Mala	Mala	Mala	Excelente	Buena	Mala	Mala	Excelente	Regular
Hidrocarburos aromáticos	Mala	Mala	Mala	Buena	Regular	Mala	Mala	Excelente	Mala
Alcoholes oxigenados	Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	. . . .	Muy buena	Excelente
Aceite, gasolina	Mala	Mala	Mala	Excelente	Buena	Mala	Mala	Excelente	Mala
Aceites animales y vegetales	De mala a buena	De mala a buena	. . .	Excelente	Excelente	Excelente	De mala a buena	Excelente	Excelente
Ácidos									
Diluidos	De regular a buena	De regular a buena	De regular a buena	Buena	Excelente	Excelente	. . . . .	Buena	Muy buena
Concentrados	De regular a buena	De regular a buena	De regular a buena	Buena	Buena	Excelente	. . . . .	Buena	Buena
Permeabilidad a gases	Baja	Baja	Baja	Muy Baja	Baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Alta
Resistencia al hinchamiento por agua	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	De regular a excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

MATERIALES PARA ALTAS TEMPERATURAS

Metales La aplicación exitosa de los metales en procesos a altas temperaturas depende de la apreciación de ciertos factores de ingeniería. Las aleaciones importantes para servicios a temperaturas de hasta 1100°C (2000°F) aparecen en la tabla 23-35. Entre las propiedades más importantes están la resistencia a la cedencia elástica, la ruptura y las fuerzas de corta duración (véase las Figs. 23-10 y 23-11). La **cedencia elástica** o **deformación progresiva** relaciona el esfuerzo aplicado inicialmente con la velocidad de flujo plástico. La **ruptura por esfuerzo** es otra consideración importante a temperaturas elevadas, puesto que relaciona el esfuerzo y el tiempo para producir rupturas. Como se muestra en las figuras, las aleaciones ferríticas son más débiles que las composiciones austeníticas y, en los dos grupos, el molibdeno incrementa la resistencia. Las piezas vaciadas austeníticas son mucho más fuertes que sus equivalentes forjadas. Se pueden obtener resistencias altas en las superaleaciones. Otras propiedades que resultan importantes a temperaturas elevadas incluyen la conductividad térmica, la dilatación térmica, la ductilidad a la temperatura, la composición de la aleación y la estabilidad.

TABLA 23-27 Propiedades de los elastómeros *(Continuación)*

Propiedad	ECO, CO Epiclorhidrina homopolímero y copolímero	Fluorosilicona	EPDM Etileno propileno	CSM Polietileno clorosulfonado	FPM Elastómeros de fluorocarburos
Propiedades físicas					
Densidad relativa	1.32-1.49	1.4	0.86	1.1-1.26	1.4-1.95
Conductividad térmica, Btu/ $[(h \cdot ft^2)(°F/ft)]$	. . .	0.13	. . . .	0.065	0.13
Coeficiente de expansión térmica, $10^{-5}/°F$	. . .	45	. . . .	27	8.8
Resistencia a la llama	Regular	Mala	Mala	Buena	Excelente
Colorabilidad	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Buena
Propiedades mecánicas					
Dureza (Shore A)	30-95	40-70	30-90	45-95	65-90
Esfuerzo a la tensión, kip/in²					
Goma pura	. . . .	1	<1	4	<2
Reforzada	2-3	<2	0.8-3.2	1.5-2.5	1.5-3
Elongación, % reforzada	320-350	200-400	200-600	250-500	100-450
Elasticidad	De mala a excelente	De buena a regular	Buena	Buena	Regular
Resistencia a la deformación por compresión	Muy buena		Buena	De regular a buena	De buena a excelente
Resistencia a la histéresis	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Resistencia a la ruptura por flexión	Muy buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Tasa lenta	Muy buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Tasa rápida	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Resistencia al desgarre	Buena	Regular	De mala a regular	De regular a buena	De mala a regular
Resistencia a la abrasión	Regular a buena	Mala	Buena	Excelente	Buena
Propiedades eléctricas					
Resistencia dieléctrica	Regular	Buena	Excelente	Excelente	Buena
Aislamiento eléctrico	Regular	Buena	Muy buena	Buena	De regular a buena
Propiedades térmicas					
Temperatura de servicio, °F					
Mínima para uso continuo	−15 a −80	−90	−60	−40	−10
Máxima para uso continuo	300	400	<350	<325	<500
Resistencia a la corrosión					
Ambiental	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Oxidación	Muy buena	Excelente	Excelente	Excelente	Sobresaliente
Ozono	De buena a excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Radiación	. . . .	Buena	Excelente	De regular a buena	De regular a buena
Agua	Buena	Excelente	De buena a excelente	Buena	Buena
Ácidos	Buena	De muy buena a excelente	De buena a excelente	Excelente	De buena a excelente
Álcalis	Buena	Muy buena	De buena a excelente	Excelente	De mala a buena
Hidrocarburos alifáticos	Excelente	Excelente	Mala	Regular	Excelente
Hidrocarburos aromáticos	Muy buena	Excelente	Regular	De mala a regular	Excelente
Hidrocarburos halogenados	Buena	. . . .	Mala	De mala a regular	Buena
Alcoholes	Buena	. . . .	Buena	Muy buena	Excelente
Lubricantes sintéticos (diéster)	De regular a buena	Excelente	De mala a regular	Mala	De regular a buena
Fluidos hidráulicos					
Silicatos	Muy buena	Excelente	De regular a buena	Buena	Buena
Fosfatos	De mala a regular	Excelente	De buena a excelente	De mala a regular	Mala

FUENTE: C. H. Harper, *Handbook of Plastics and Elastomers*, McGraw-Hill, New York, 1975, tabla 35. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.* °C = (°F − 32) × ⁵/₉; para convertir unidades térmicas británicas por hora-pie-grado Fahrenheit en watts por metro-grado Celsius, multiplíquese por 0.861; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.895×10^{-3}.

En realidad, en muchos casos, las propiedades mecánicas y la resistencia llegan a tener una importancia secundaria en las aplicaciones de procesamiento, en comparación con la resistencia a los ambientes corrosivos. Todas las aleaciones comunes resistentes al calor forman óxidos cuando se exponen a los **ambientes oxidantes calientes**. El hecho de que una aleación sea o no resistente depende de que el óxido sea estable y forme una película protectora. Así, el acero dulce se utiliza raramente por encima de 480°C (900°F) debido a los índices excesivos de escamado. A temperaturas más altas requieren cromo (véase la Fig. 23-12). Así, el acero del tipo 502, con 4 a 6% de Cr, es aceptable a 620°C (1150°F). Un acero con 9 a 12% de Cr manejará temperaturas de 730°C (1350°F); el de 14 a 18% de Cr extiende el límite a 800°C (1500°F); y el de 27% de cromo hasta 1100°C (2000°F).

Los aceros inoxidables austeníticos, muy conocidos, tienen una excelente resistencia a la oxidación: hasta 900°C (1650°F) para el 18-8 y hasta 1100°C (2000°F) para el 25-12 (el Inconel 600 y el Incoloy 800). Las aleaciones con base de cobalto, de las cuales el Stellite 25 es un buen ejemplo, tienen excelentes resistencias hasta 1100°C (2000°F).

Otro elemento útil para proporcionar resistencia a la oxidación del acero es el **silicio** (que complementa los efectos del cromo). En las gamas de bajo contenido de cromo, el silicio en cantidades de 0.75 a 2% es más eficiente que el cromo sobre la base de porcentaje por peso. La influencia del 1% de silicio para mejorar el índice de oxidación de los aceros con contenidos variables de cromo se muestra en la figura 23-13.

TABLA 23-28 Pr... de empaque*

Material
Caucho (puro):
Natural . . . . . .
Estireno-Butadieno (SBR) . . . . . .
Butilo . . . .
Nitrilo . . . .
Polisulfuro . . . .
Neopreno . . . . .
Silicones . . . . .
Acrílico . . . . .
Polietileno clorosulfo... (Hypalon)
Fluoroelastómeros (... Fluorel 2141, Kel-...

* De *Materials in* ... 1959, pp. 111-126. °...

FPM
Elastómeros
de fluorocarburos

1.4-1.95
0.13

8.8

Excelente
Buena

65-90

<2
1.5-3
100-450
Regular
De buena a excelente
Buena
Buena
Buena
Buena
De mala a regular
Buena

Buena
De regular a buena

-10
<500

Excelente
Sobresaliente
Excelente
De regular a buena
Buena
De buena a excelente

De mala a buena
Excelente
Excelente
Buena
Excelente
De regular a buena

Buena
Mala

fCorrosion Engineers.
or 0.861; para convertir

cidos, tienen una ex-
1650°F) para el 18-8
nel 600 y el Incoloy
uales el Stellite 25 es
icias hasta 1100°C

ia a la oxidación del
s del cromo). En las
cantidades de 0.75 a
porcentaje por peso.
dice de oxidación de
muestra en la figura

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque*

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Caucho (puro):		
Natural	225	Buenas propiedades mecánicas. Impermeable al agua. Resistencia regular a buena a los ácidos y los álcalis. Mala resistencia a los aceites y la gasolina. Malas propiedades de envejecimiento e intemperie.
Estireno-Butadieno (SBR)	250	Mejor resistencia al agua que la del caucho natural. Resistencia regular a buena a los ácidos y los álcalis. No es adecuado con gasolina, aceites y disolventes.
Butilo	300	Muy buena resistencia al agua, los álcalis y muchos ácidos. Mala resistencia a los aceites, la gasolina y la mayor parte de los disolventes (excepto los oxigenados).
Nitrilo	300	Muy buena resistencia al agua. Excelente resistencia a los aceites, la gasolina. Resistencia regular a buena a los ácidos y los álcalis.
Polisulfuro	150	Resistencia excelente a los aceites, la gasolina y los hidrocarburos alifáticos y aromáticos disolventes. Muy buena resistencia al agua. Buena resistencia a los álcalis. Resistencia regular a los ácidos. Malas propiedades mecánicas.
Neopreno	250	Propiedades mecánicas excelentes. Buena resistencia al petróleo no aromático, los aceites grasos y los disolventes (excepto los tipos aromáticos, clorados o de cetona). Buena resistencia al agua y los álcalis. Resistencia regular a los ácidos.
Silicones	600	Excelente resistencia al calor. Resistencia regular al agua; mala resistencia al vapor a altas presiones. Resistencia de regular a buena a los ácidos y los álcalis. Baja resistencia (excepto los cauchos fluorosilicones) a los aceites y los disolventes.
Acrílico	450	Buena resistencia al calor; pero mala resistencia al frío. Buena resistencia a los aceites y los hidrocarburos alifáticos y aromáticos. Mala resistencia al agua, los álcalis y algunos ácidos.
Polietileno clorosulfonado (Hypalon)	250	Excelente resistencia a los productos químicos oxidantes, el ozono y la intemperie. Resistencia relativamente buena a los aceites y las grasas. Mala resistencia a los hidrocarburos aromáticos y clorados. Buenas propiedades mecánicas.
Fluoroelastómeros (Viton, Fluorel 2141, Kel-F)	450	Se puede utilizar a altas temperaturas con muchos combustibles, lubricantes, fluidos hidráulicos y disolventes. Muy resistente al ozono y la intemperie. Buenas propiedades mecánicas.

* De *Materials in Design Engineering*, Reinhold, New York, diciembre de 1959, pp. 111-126. °C = (°F − 32) × 5/9.

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque* *(Continúa)*

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Asbesto:		
Lámina de caucho y asbesto comprimidos	Hasta 700	Hay un gran número de combinaciones; las propiedades varían mucho, según sean los materiales utilizados.
Láminas de asbesto y caucho tejidos	Hasta 250	Igual que el anterior.
Asbesto-caucho (proceso de adición en batidora)	400	Igual que el anterior.
Compuestos de asbesto	Hasta 1000	Igual que el anterior.
Asbesto-TFE	500	Combina las propiedades selladoras y de resistencia al calor del asbesto con la resistencia química del TFE.
Composición de corcho	250	Bajo costo. Materiales verdaderamente compresibles que permiten deflexiones importantes con un flujo lateral despreciable. Se conforma bien a las superficies irregulares. Resistencia elevada a los aceites; buena resistencia al agua y muchos productos químicos. No se debe utilizar con ácidos inorgánicos, álcalis, soluciones oxidantes y vapor vivo.
Caucho de corcho	300	Propiedades de compresibilidad controlada. Buena conformabilidad, resistencia buena a la fatiga. La resistencia a los productos químicos depende del tipo de caucho que se utilice.
Plásticos:		
TFE (sólido) (Tetrafluoroetileno, teflón)	500	Excelente resistencia a casi todos los productos químicos y los disolventes; buena resistencia al calor, propiedades excepcionalmente buenas a bajas temperaturas. Relativamente poca compresibilidad y baja elasticidad.
TFE (con carga)	Hasta 500	Propiedades mecánicas y físicas mejoradas selectivamente; sin embargo, los materiales de carga pueden reducir la resistencia a algunos productos químicos específicos.
Compuesto de TFE	Hasta 500	Resistencia química y térmica semejante a las del TFE sólido. El material de empaque interno proporciona mejor elasticidad y deformabilidad.
CFE (Clorotrifluoroetileno, Kel-F)	350	Cuesta más que el TFE. Mejor resistencia química que la mayor parte de los otros materiales de empaque; aunque no tan buena como la del TFE.
Vinilo	212	Buena compresibilidad y elasticidad. Resistente al agua, los aceites, la gasolina y muchos ácidos y álcalis. Gama de temperaturas relativamente estrecha.
Polietileno	150	Resiste la mayor parte de los disolventes. Baja termorresistencia.
Fibras vegetales:		
Fibras de madera impregnadas con neopreno	175	No poroso: se recomienda para glicol, aceites y gasolina a 175°F.

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque* *(Continúa)*

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Algodón aglutinado con SBR	230	Buena resistencia al agua.
Fibras de celulosa con caucho de nitrilo	......	Es resistente a los aceites a altas temperaturas.
Fibras vegetales, aglutinante de cola	212	Es resistente a los aceites y al agua a 212°F.
Fibras vulcanizadas	......	Bajo costo, buenas propiedades mecánicas. Es resistente a la gasolina, los aceites, las grasas, las ceras y muchos disolventes.
Fibras inorgánicas	Hasta 2200°F	Excelente resistencia al calor; malas propiedades mecánicas.
Fieltro:		
Fieltro puro	......	Elástico, compresible y fuerte; pero no impermeable. Es resistente a los ácidos minerales de concentración media y las soluciones minerales diluidas, si no se desecan intermitentemente. Es resistente a los aceites, las grasas, las ceras y la mayor parte de los disolventes. Lo dañan los álcalis.
Impregnado con TFE	300	Buena resistencia química y al calor.
Impregnado de petrolato o parafina	......	Alta repelencia al agua.
Impregnado de caucho	......	Muchas combinaciones disponibles; las propiedades varían mucho, según los materiales utilizados.
Metales:		
Plomo	500	Buena resistencia química. Es el que mejor se conforma de entre todos los empaques metálicos.
Estaño	......	Buena resistencia a las soluciones neutras. Lo atacan los ácidos y los álcalis.
Aluminio	800	Alta resistencia a la corrosión. Lo atacan ligeramente los ácidos fuertes y los álcalis.
Cobre, latón	......	Buena resistencia a la corrosión a temperaturas moderadas.
Níquel	1400	Alta resistencia a la corrosión.
Monel	1500	Alta resistencia a la corrosión. Bueno contra la mayor parte de los ácidos y los álcalis; pero lo atacan los ácidos oxidantes fuertes y el clorhídrico fuerte.
Inconel	2000	Excelente resistencia al calor y la oxidación.
Acero inoxidable	......	Alta resistencia a la corrosión. Las propiedades dependen del tipo utilizado.
Compuestos metálicos	......	Hay muchas combinaciones disponibles; las propiedades varían mucho, según el material utilizado.
Cuero	220	Bajo costo. Resistencia limitada a los productos químicos y el calor. No se recomienda para vapor a presión ni soluciones ácidas o alcalinas.
Tela de vidrio	......	Muy fuerte y resistente al calor. Se puede impregnar con TFE para darle una alta resistencia a los productos químicos.

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque* *(Continúa)*

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Materiales para sellado y empaque		
Caucho (puro)	Hasta 600	Véanse las propiedades en Materiales de empaque. Se utiliza primordialmente para sellos del tipo de anillo; aunque existen algunos tipos en la forma de empaque de espiral.
Compuestos de caucho:		
Reforzados con algodón	350	Muy fuerte. La resistencia química depende del tipo de caucho que se utilice; sin embargo, la mayor parte de los tipos destacan por su alta resistencia al agua y las soluciones acuosas.
Reforzados con asbesto	450	Muy fuerte, con buena resistencia al calor.
Asbesto:		
Asbesto simple, trenzado	500	Resistencia al calor combinada con resistencia al agua, las salmueras, los aceites y muchos productos químicos. Se puede reforzar con alambre.
Asbesto impregnado	Hasta 750	Las propiedades ambientales varían mucho, según el tipo de asbesto y el impregnante utilizado. El tipo cementado con neopreno es resistente a los aceites calientes, la gasolina y los disolventes. El tipo impregnado con aceites y cera es resistente a los cáusticos. El tipo de asbesto azul impregnado con cera tiene una alta resistencia a los ácidos. El tipo impregnado con TFE tiene una buena resistencia química general.
Compuestos de asbesto	Hasta 1200	Las propiedades finales varían mucho, según el material secundario que se utiliza.
Metales:		
Cobre	Hasta 1500	Las propiedades dependen de otros materiales de construcción y la forma de cobre que se use. Los empaques hechos de tela de cobre sobre un núcleo de asbesto resisten el vapor y los álcalis hasta 1000°F. Los empaques de cobre trenzado son resistentes al agua, el vapor y los gases hasta 1500°F.
Aluminio	Hasta 1000	Es resistente a los derivados calientes del petróleo, los gases, los productos alimenticios y muchos ácidos orgánicos.
Plomo	550	Existen muchos tipos.
Fibras orgánicas:		
Lino	300	Buena resistencia al agua.
Yute	300	Buena resistencia al agua.
Ramio	300	Buena resistencia al agua, la salmuera y los aceites fríos.
Algodón	300	Buena resistencia al agua, los alcoholes y las soluciones acuosas diluidas.
Rayón	300	Buena resistencia al agua y las soluciones acuosas diluidas.
Fieltro	300	Véase Materiales de empaque.

TABLA 23-28 P de empaque* (C

Material
Materiale
Cuero ......

TABLA 23-29 I

Densidad relativa
Resistencia a la trac
Resistencia a la com
Resistencia a la flex
Módulo de elasticid
Expansión térmica,
Conductividad térm
Máxima temperatu
Máxima temperatu

FUENTE: Carborun

TABLA 23-30

Densidad relativa .
Dureza, escala de M
Módulo de ruptura, l
Módulo de elasticida
Resistencia a la com
Volumen de poros, 9
Absorción de agua,
Dilatación térmica li
Conductividad térm

El **aluminio** me así como también está limitado porq lidad de trabajo y ras del acero. Sin e contenido de alum tado es un medio aceros de baja ale

Atmósferas de en virtud de su co mósferas de hidró

Corrosión por ra impartir resist sulfúricas similar lizan generalmen a su calidad de fa aleación tiende a

Halógenos (Cl quel y el níquel p go, incluso con lo

de materiales

ades importantes

jue

piedades en Materiales
. Se utiliza primordial-
ellos del tipo de anillo;
ten algunos tipos en la
paque de espiral.

resistencia química de-
o de caucho que se utili-
argo, la mayor parte de
stacan por su alta resis-
a y las soluciones acuo-

on buena resistencia al

l calor combinada con
al agua, las salmueras,
muchos productos quí-
uede reforzar con alam-

des ambientales varían
ún el tipo de asbesto y el
e utilizado. El tipo ce-
n neopreno es resistente
s calientes, la gasolina y
ites. El tipo impregnado
y cera es resistente a los
El tipo de asbesto azul
con cera tiene una alta
a los ácidos. El tipo im-
on TFE tiene una buena
química general.

les finales varían mucho,
aterial secundario que se

ides dependen de otros
de construcción y la for-
e que se use. Los empa-
s de tela de cobre sobre un
sbesto resisten el vapor y
hasta 1000°F. Los empa-
ore trenzado son resisten-
el vapor y los gases hasta

a los derivados calientes
, los gases, los productos
s y muchos ácidos orgá-

os tipos.

ncia al agua.

ncia al agua.

ncia al agua, la salmuera
s fríos.

ncia al agua, los alcoho-
luciones acuosas diluidas.

ncia al agua y las solucio-
s diluidas.

iales de empaque.

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque* (*Continúa*)

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Materiales para sellado y empaque (*Continuación*)		
Cuero	Hasta 210	Buenas propiedades mecánicas para el sellado. Es resistente al alcohol, la gasolina, muchos aceites y disolventes, fluidos hidráulicos sintéticos y el agua.

TABLA 23-28 Propiedades importantes de materiales de empaque* (*Continúa*)

Material	Temp. máx. de serv., °F	Propiedades importantes
Materiales para sellado y empaque (*Conclusión*)		
TFE	Hasta 500	Existe en muchas formas y todas ellas tienen una elevada resistencia química.
Carbono-grafito	700	Buenas propiedades de soporte y autolubricación. Buena resistencia a los productos químicos y el calor.

TABLA 23-29 Propiedades del grafito y del carburo de silicio

	Grafito	Grafito impermeable	Carburo de silicio impermeable
Densidad relativa	1.4-1.8	1.75	3.10
Resistencia a la tracción, lbf/in^2 (MPa)	400-1400 (3-10)	2600 (18)	20 650 (143)
Resistencia a la compresión, lbf/in^2 (MPa)	2000-6000 (14-42)	10 500 (72)	150 000 (1000)
Resistencia a la flexión, lbf/in^2 (MPa)	750-3000 (5-21)	4700 (32)	
Módulo de elasticidad ($\times 10^6$), lbf/in^2 (MPa)	0.5-1.8 (0.3-12 $\times 10^4$)	2.3 (1.6 $\times 10^4$)	56 (39 $\times 10^4$)
Expansión térmica, in/(in · °F $\times 10^{-6}$)[mm/(mm · °C)]	0.7-2.1 (1.3-3.8)	2.5 (4.5)	1.80 (3.4)
Conductividad térmica, Btu/[(h · ft^2)(°F/ft)] [(W/(m · K)]	15-97 (85-350)	85 (480)	60 (340)
Máxima temperatura de trabajo (en atmósfera inerte), °F (°C)	5000 (2800)	350 (180)	4200 (2300)
Máxima temperatura de trabajo (en atmósfera oxidante), °F (°C)	660 (350)	350 (180)	3000 (1650)

FUENTE: Carborundum Co. *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

TABLA 23-30 Propiedades de la loza y la porcelana

	Loza	Porcelana
Densidad relativa	2.2-2.7	2.4-2.9
Dureza, escala de Mohs	6.5	7.5
Módulo de ruptura, lb/in^2	3-7 000	8-15 000
Módulo de elasticidad, lb/in^2	5-10 $\times 10^6$	10-15 $\times 10^6$
Resistencia a la compresión, lb/in^2	40-60 000	60-90 000
Volumen de poros, %	1.5	0.2-0.5
Absorción de agua, %	0.5-4.0	0-0.05
Dilatación térmica lineal, por °F	2.4 $\times 10^{-6}$	2.5 $\times 10^{-6}$
Conductividad térmica, Btu/(ft^2)(h)(°F/in)	8-22	8-10

El **aluminio** mejora también la resistencia del hierro a la oxidación, así como también a la sulfuración; pero el uso como agente de aleación está limitado porque la cantidad que se requiere interfiere con la facilidad de trabajo y con las propiedades de resistencia a altas temperaturas del acero. Sin embargo, el desarrollo de capas superficiales con alto contenido de aluminio mediante la aspersión, la inmersión y el cementado es un medio factible para mejorar la resistencia térmica de los aceros de baja aleación.

Atmósferas de hidrógeno Los aceros inoxidables austeníticos, en virtud de su contenido elevado de cromo, son resistentes en las atmósferas de hidrógeno.

Corrosión por azufre El cromo es el material más importante para impartir resistencia contra la sulfuración (formación de escamas sulfúricas similares a las de óxido). Las aleaciones austeníticas se utilizan generalmente debido a sus propiedades mecánicas superiores y a su calidad de fabricación, a pesar de que el contenido de níquel en la aleación tiende a desmejorar la resistencia a la sulfuración.

Halógenos (Cl_2 y HCl, calientes y secos) Las aleaciones de níquel y el níquel puro son útiles con gases halógenos secos. Sin embargo, incluso con los mejores materiales, las velocidades de corrosión son relativamente altas a temperaturas elevadas. Hay casos en que los equipos para la halogenación a altas temperaturas utilizan aleaciones con base de níquel y revestimiento de platino. Esos materiales tienen un costo inicial elevado; pero son de vida prolongada. El platino y el oro poseen una resistencia excelente al HCl seco, incluso a 1100°C (2000°F).

Refractarios Los refractarios se eligen atendiendo a cuatro objetivos:

1. Resistencia al calor
2. Resistencia al ataque químico a alta temperatura
3. Resistencia a la erosión por gases que contengan partículas finas
4. Resistencia a la abrasión por gases que contengan partículas grandes

Los refractarios se pueden conseguir en el mercado en tres formas físicas generales: como sólidos en forma de ladrillos, como cerámica monolítica de fundición y como fibras de cerámica.

El primer método que se debe aplicar en la selección de un tipo de refractario es la velocidad del gas:

< 7.5 m/s (25 ft/s): fibras

7.5-60 m/s (25-200 ft/s): cerámica monolítica de fundición

> 60 m/s (200 ft/s): ladrillos

Cuando se tienen gases con sólidos, la selección se vuelve de suma importancia debido a que, con ladrillos, las partículas finas contenidas en el gas eliminan las juntas del mortero y en el caso de cerámica monolítica de fundición, que no tiene juntas, el refractario es menos denso y menos resistente al desgaste.

Aislamiento interno El empleo de aislantes dentro de los recipientes (en oposición a los materiales de aislamiento utilizados en el exterior del equipo) se lleva a cabo con mantas de fibra y agregados de cementos de cerámica de peso ligero. Este sistema de construcción incluye con frecuencia el uso de una camisa delgada de alta aleación (con las juntas deslizables para permitir la expansión térmica) a fin de proteger la cerámica de la erosión. En muchos casos este diseño es más

TABLA 23-31 Maderas para equipos químicos

Condiciones de las maderas después de 31 días de inmersión en soluciones frías
Examinadas después de siete días de desecación

	Fresno	Roble	Pino de Oregón	Pino amarillo	Abeto	Secoya	Arce	Ciprés
Ácido clorhídrico, 5%	NAC	NAC	NAC	SS	SS	SS	NAC	NAC
Ácido clorhídrico, 10%	NAC	NAC	NAC	SS	SS	SS	NAC	NAC
Ácido clorhídrico, 50%	SS,SB,SWF	SS,WF	S,WF	S,WF	S,WF	S,WF	S,WF	S,WF
Ácido sulfúrico, 1%	NAC	NAC	NAC	SS	SS	NAC	NAC	SS,SB
Ácido sulfúrico, 5%	SS	SS	SS	SS	SS,SB	SS,SB	NAC	SS,SB
Ácido sulfúrico, 10%	S,FSD	S,FSD	S,FSD	S,FSD	S,FSD	S,FSD	S,FSD	S,FSD
Ácido sulfúrico, 25%	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD
Sosa cáustica, 5%	S,NAC	MSh,SWp	SS	SS,FSD	SSp,FSD	SSp,FSD	MSh	SSp,FSD
Sosa cáustica, 10%	S,FSD	MSh,WF,Horny	SS	SS,SB,FSD	SS,SB,FSD	SS,SB,FSD	MSh	S,SB,FSD
Alumbre, 13%	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC
Carbonato de sodio, 10%	SB,GC	NAC	GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	GC	SB,GC
Cloruro de calcio, 25%	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC
Sal común, 25%	NAC	NAC	NAC	SS,GC	SS,GC	SS,GC	NAC	NAC
Agua	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC	NAC
Sulfuro de sodio	SS,SB	MSh,WF	SB	SB	SB	SB	MSh,FSD	FSD

Condiciones de las maderas después de ocho horas de ebullición en soluciones
Examinadas después de siete días de desecación

	Fresno	Roble	Pino de Oregón	Pino amarillo	Abeto	Secoya	Arce	Ciprés
Ácido clorhídrico, 10%	SB,S	FSD	FSD	FSD	FSD	FSD	FSD	FSD
Ácido clorhídrico, 50%	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG	FD,Ch,B,S,NG
Ácido sulfúrico, 4%	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC
Ácido sulfúrico, 5%	SS,GC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	SB,FSD	SB,GC	SB,GC	SB,FSD
Ácido sulfúrico, 10%	SS,GC	BFD,Wpd,NG	Sp,FD,NG	B,Sp,FD,NG	B,Sp,FD,NG	SB,FSD	SB,FSD	B,FD
Sosa cáustica, 5%	SS	MSh	S	GC	S,GC	S,GC	Sh	SSp
Alumbre, 13%	SB,GC	NAC	NAC	SB,GC	SB,GC	SB,GC	NAC	SB,GC
Carbonato de sodio, 10%	SB,GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	SB,GC
Cloruro de calcio, 25%	SB,GC	SB,SS,GC	NAC	SB,GC	SB,GC	NAC	NAC	SB,GC
Sal común, 25%	NAC	NAC	NAC	SB,GC	NAC	SB,GC	NAC	NAC
Agua	NAC	NAC	NAC	SB,GC	NAC	NAC	NAC	NAC

TABLA 23-32 Comparación de propiedades de metales refractarios

Punto de fusión, °F	Elemento	Ventajas	Desventajas
6180	Tungsteno	Punto de fusión más elevado: óxido no volátil hasta, por lo menos, 2500°F	La densidad más alta; se oxida con rapidez, frágil a bajas temperaturas
5425	Tantalio	Punto de fusión muy elevado: óxido no volátil, dúctil	Alta densidad; se oxida rápidamente; el menos abundante
4730	Molibdeno	Punto de fusión elevado; menos denso que el tungsteno o el tantalio; moderadamente dúctil a la temperatura ambiente	Velocidad de oxidación extremadamente elevada (óxido volátil)
4380	Niobio (Columbio)	Punto de fusión elevado; óxido no volátil, dúctil; de densidad moderada	Se oxida con rapidez
3435	Cromo	Extremadamente resistente a la oxidación; el más ligero de los metales refractarios	El punto de fusión más bajo de entre todos los metales refractarios; frágil a bajas temperaturas

económico que el equipo aislado externamente debido a que permite el empleo de materiales estructurales de baja aleación que son menos costosos.

Ladrillos refractarios Los materiales refractarios no metálicos se utilizan mucho en aplicaciones a altas temperaturas, donde el servicio permite el tipo apropiado de construcción. Las clases más importantes se describen en los siguientes párrafos.

Las arcillas refractarias se pueden dividir en arcillas plásticas y arcillas de pedernal duro. También se pueden clasificar según su contenido de alúmina. Los **ladrillos refractarios** se hacen, por lo común, con una mezcla combinada de arcilla de pedernal y plástica que es moldeada, después de mezclarse con agua, en la forma que se requiere. Parte de la arcilla de pedernal o toda ella se puede reemplazar con arcilla muy quemada o calcinada. Una proporción grande de la producción moderna de ladrillos se moldea mediante el proceso de prensa de potencia o prensa en seco, en donde la conformación se lleva a cabo a altas presiones y con un bajo contenido de agua. Los ladrillos extruidos y moldeados a mano se producen todavía en grandes cantidades. Los ladrillos secos se queman en hornos periódicos o de túnel, a temperaturas de entre 1200 y 1500°C (2200 y 2700°F). Los hornos de túnel permiten la producción continua y una temperatura uniforme de cocción.

Los ladrillos de arcilla refractaria se utilizan en hornos secadores, hornos para hierro maleable, incineradores y muchas porciones de hornos metalúrgicos. Son resistentes al astillado y resisten bien muchas condiciones de escoriado; pero, en general, no son convenientes para utilizarse con escorias de alto contenido de cal, escorias de cenizas de carbón fluidas o en condiciones de carga intensa.

Los **ladrillos de alto contenido de alúmina** se fabrican a partir de materias primas ricas en alúmina, como el diásporo. Se gradúan en

TABLA 23-33 (

Tipo de ladrillo	Com…
Sílice	SiO_2, …
Arcilla refractaria de alta resistencia	SiO_2, … Al_2O_3
Arcilla refractaria de resist. super alta	SiO_2, … Al_2O_3
Resistente a los ácidos (tipo H)	SiO_2, … Al_2O_3
Ladrillos aislantes	Varía…
Alúmina alta	Al_2O_3
Alúmina extra alta	Al_2O_3
Mullita	Al_2O_3
Cromo refractario	Mine… crom…
Magnesita-aglutinada con cromo §	MgO … CrO … FeO … AlO … SiO_2
Magnesita-cromo refractario	
Magnesita-cromo de alta cocción	
Aglomerado de magnesita §	MgO
Magnesita refractaria	
Circón	ZrO_2 SiO_2
Circonia (estabilizada)	ZrO_2 CaO
Carburo de silicio	SiC, …
Grafito	C, 9…

* De *Chem. Eng*…
† Se disocia por…
‡ Buena por enc…
§ Con enlace quí…

grupos con 50, 6… cocción es adecu… y menos de la fas… refractarios. El c… drillos. En gener… zan para condicio… severas. Se empl… cemento en los o… la resistencia al e… es más alto que e…

TABLA 23-33 Características físicas y químicas generales de los ladrillos refractarios *

Tipo de ladrillo	Composición usual	Densidad volumétrica aproximada lb/ft³	Punto de fusión, °F	Naturaleza química	Deformación bajo carga en caliente	Porosidad aparente, %	Permeabilidad	Resistencia al calor	Resistencia a los choques térmicos	Resistencia química: A ácidos	Resistencia química: A álcalis
Sílice	SiO_2, 95%	115	3100	Ácida	Excelente	21	Alta	Excelente	Mala ‡	Buena	Buena a bajas temperaturas
Arcilla refractaria de alta resistencia	SiO_2, 54% Al_2O_3, 40 %	134	3125	Ácida	Regular	18	Moderada	Regular	Regular	Buena	Buena a bajas temperaturas
Arcilla refractaria de resist. super alta	SiO_2, 52% Al_2O_3, 42 %	140	3170	Ácida	Buena	15	Alta	Regular	Buena	Buena	Buena a bajas temperaturas
Resistente a los ácidos (tipo H)	SiO_2, 59% Al_2O_3, 34 %	142	30-40	Ácida	Mala	7	Baja	Mala	Buena	Insoluble en ácidos, excepto en fluorhídrico y fosfórico en ebullición	Muy resistente en concentraciones moderadas
Ladrillos aislantes	Varía	30-75	Varía	...	Mala	65-85	Alta	Mala	Excelente	Mala	Mala
Alúmina alta	Al_2O_3, 50-85 %	170	3200-3400	Ligeramente ácida	Buena	20	Baja	Buena	Buena	Buena, excepto para el fluorhídrico y el agua regia	Ataques muy ligeros con soluciones calientes
Alúmina extra alta	Al_2O_3, 90-99 %	185	3000-3650	Neutra	Excelente	23	Baja	Excelente	Buena		
Mullita	Al_2O_3, 71 %	153	3290	Ligeramente ácida	Excelente	20	Baja	Buena	Buena	Insoluble en la mayor parte de los ácidos	Reacción ligera
Cromo refractario	Mineral de cromo, 100%	195	Varía	Neutra	Regular	20	Baja	Buena	Mala	Regular a buena	Mala
Magnesita-aglutinada con cromo §		190			Buena	12	Muy baja	Buena	Excelente		
Magnesita-cromo refractario	MgO, 50-80% Cr_2O_3, 5-18% Fe_2O_3, 3-13% Al_2O_3, 6-11 % SiO_2, 1.2-5%	180	Varía	Básica	Excelente	20	Alta	Buena	Excelente	Regular, excepto con ácidos fuertes	Resistencia regular a bajas temperaturas
Magnesita-cromo de alta cocción		180			Excelente	18	Alta	Excelente	Excelente		
Aglomerado de magnesita §	MgO, 95%	181	3900	Básica	Buena	11	Baja	Buena	Buena	Soluble en la mayor parte de los ácidos	Buena resistencia a bajas temperaturas
Magnesita refractaria		178			Buena	19	Moderada	Buena	Buena		
Circón	ZrO_2, 67% SiO_2, 33%	200	3100†	Ácida	Excelente	25	Muy baja	Excelente	Buena	Muy ligera	Muy ligera
Circonia (estabilizada)	ZrO_2, 94% CaO_2, 4%	245	4800	Ligeramente ácida	Excelente	23	Baja	Excelente	Excelente	Muy ligera	Muy ligera
Carburo de silicio	SiC, 80-90%	160	4175	Ligeramente ácida	Excelente	15	Muy baja	Excelente	Excelente	Reacción ligera con fluorhídrico	Es atacado a altas temperaturas
Grafito	C, 97%	105	6400	Neutra	Excelente	16	Baja	Excelente	Excelente	Insoluble	Insoluble

* De *Chem. Eng.*, 100 (julio 31, 1967). Para convertir libras por pie cúbico en kilogramos por metro cúbico, multiplíquese por 0.0624; °C = (°F − 32) × 5/9.
† Se disocia por encima de 1700°C (3100°F).
‡ Buena por encima de 650°C (1200°F).
§ Con enlace químico.

grupos con 50, 60, 70, 80 y 90% de contenido de alúmina. Cuando la cocción es adecuada, esos ladrillos contienen gran cantidad de mullita y menos de la fase vidriosa que se encuentra presente en los ladrillos refractarios. El corindón está presente también en muchos de esos ladrillos. En general, los ladrillos de alto contenido de alúmina se utilizan para condiciones de carga y temperaturas desacostumbradamente severas. Se emplean mucho en hornos de cal y hornos giratorios para cemento en los orificios y los regeneradores de tanques de vidrio y para la resistencia al escoriado en algunos hornos metalúrgicos. Su precio es más alto que el de los ladrillos refractarios.

Los **ladrillos de sílice** se fabrican a partir de rocas trituradas de arcillas refractarias para recubrimiento de hornos, que contienen aproximadamente, 97 a 98% de sílice. Se emplea un aglutinante que consiste en 2% de cal y los ladrillos se cuecen en hornos periódicos a temperaturas de 1500 a 1540°C (2700 a 2800°F), durante varios días, hasta obtener un volumen estable. Resultan especialmente valiosos cuando se requiere buena resistencia a las temperaturas elevadas. Recientemente, los ladrillos de sílice para usos especiales se están empleando en la industria acerera. Tienen un contenido menor de alúmina y, con frecuencia, una porosidad más baja.

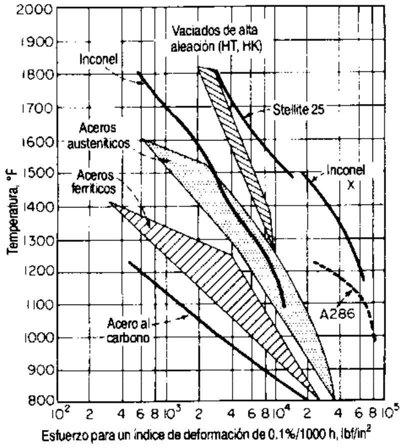


FIG. 23-10 Efectos de la deformación progresiva sobre metales para empleo a altas temperaturas [*Chem. Eng.*, 139 (Dic. 15, 1958)]. °C = (°F − 32) × $^5/_9$; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.895×10^{-3}.

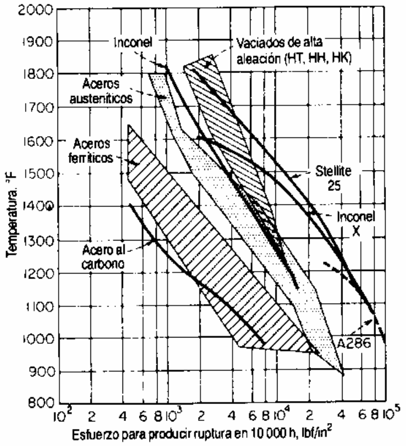


FIG. 23-11 Propiedades de ruptura de metales en función de la temperatura [*Chem. Eng.*, 139 (Dic. 15, 1958)]. °C = (°F − 32) × $^5/_9$; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.895×10^{-3}.

Los ladrillos de sílice se utilizan mucho en los hornos de coque, los techos y las paredes de los hornos de hogar abierto, los techos y las paredes laterales de los tanques de vidrio y como recubrimiento de hornos acereros eléctricos ácidos. Aun cuando el ladrillo de sílice se astilla con facilidad (se resquebraja debido a los cambios de temperatura) por debajo del calor rojo, es muy estable si se mantiene la temperatura por encima de esa gama y, por esta razón, soporta bien las condiciones de los hornos regeneradores. Cualquier estructura de ladrillo de sílice se debe calentar con lentitud hasta llegar a la temperatura de trabajo; con frecuencia, una estructura grande requiere dos semanas o más.

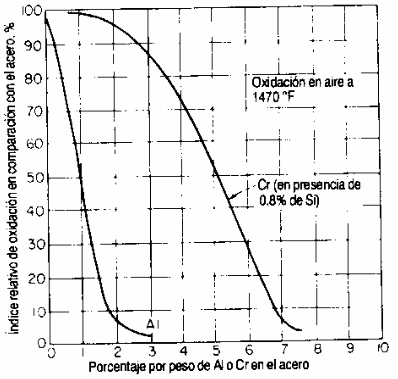


FIG. 23-12 Modo como el Cr y el Al reducen la oxidación del acero. °C = (°F − 32) × $^5/_9$.

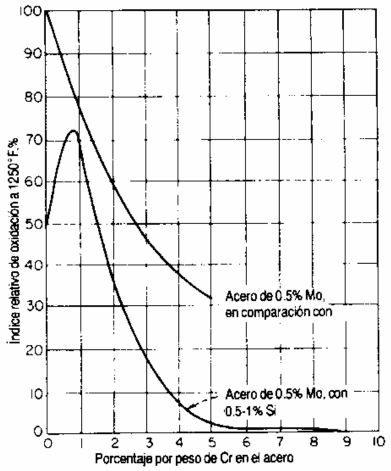


FIG. 23-13 Efectos del silicio sobre la resistencia a la oxidación. °C = (°F − 32) × $^5/_9$.

Los **ladrillos de magnesita** se hacen con óxido de magnesio triturado, que se produce mediante la calcinación de roca bruta de magnesita a temperaturas elevadas. Una roca que contiene varios puntos de porcentaje de óxido de hierro es preferible, ya que permite que se cueza a una temperatura más baja que en el caso de que se utilizaran materiales puros. Los ladrillos de magnesita se cuecen en general a una temperatura relativamente alta, en hornos periódicos o de túnel. Gran parte de los ladrillos de magnesita que se fabrican en Estados Unidos utilizan materias primas extraídas del agua del mar.

Los ladrillos de magnesita son de carácter básico y se emplean siempre que sea necesario oponer resistencia a las escorias de alto contenido de cal, como sucede en los hornos acereros de hogar abierto básico. También se emplean en hornos para las industrias de refinación de plomo y cobre. Los ladrillos no cocidos y muy comprimidos se emplean mucho como recubrimientos para los hornos de cemento. Los ladrillos de magnesita no son tan resistentes al astillado como los de arcilla refractaria.

TABLA 23-34 Te
excesivo en aire

Aleación
Acero al carbono
Acero $^1/_2$Mo
Acero 1Cr $^1/_2$Mo
Acero $2^1/_4$Cr 1Mo
Acero 5Cr $^1/_2$Mo
Acero 9Cr 1Mo
AISI 410
AISI 304
AISI 321
AISI 347
AISI 316
AISI 309
AISI 310

* *Cortesía de Natio*

Los **ladrillos de** de magnesita, pero minerales comercia ten también ladrillo mente.

Los ladrillos de c rias. Se utilizan co y también para em Los ladrillos no co mucho en las pared cromo se utilizan e punto, para la refin que combinan dive en la actualidad en quiera de esos mate

Los **ladrillos re** consisten de caolín son de peso ligero (peso de la arcilla re todos modos, son b en forma adecuada do paredes delgada do de calor. El **bajo** so para el ahorro de cambios rápidos d drillos se producen la mezcla de mater eliminarlas y deja burbujas en la mezc en el ladrillo refrac fican en varios gru gan hasta 870, 110 2600 y más de 280

Los refractarios de tratamientos té emplean mucho e cesamiento químic las cámaras de co dos con aceite. Su dos a los que reem construcción de h den cortar o maqu son resistentes a la

Hay ciertos tip productores indiv son particularmen peraturas muy alt el caso de los amb

TABLA 23-34 Temperaturas mínimas sin escamado excesivo en aire (servicio continuo)*

Aleación	°F	°C
Acero al carbono	1050	565
Acero $^1/_2$Mo	1050	565
Acero 1Cr $^1/_2$Mo	1100	595
Acero 2$^1/_4$Cr 1Mo	1150	620
Acero 5Cr $^1/_2$Mo	1200	650
Acero 9Cr 1Mo	1300	705
AISI 410	1300	705
AISI 304	1600	870
AISI 321	1600	870
AISI 347	1600	870
AISI 316	1600	870
AISI 309	2000	1090
AISI 310	2100	1150

* *Cortesía de National Association of Corrosion Engineers.*

Los **ladrillos de cromo** se fabrican casi en la misma forma que los de magnesita, pero se producen con mineral natural de cromita. Los minerales comerciales contienen siempre magnesia y alúmina. Existen también ladrillos de cromo no cocidos y comprimidos hidráulicamente.

Los ladrillos de cromo son muy resistentes a todos los tipos de escorias. Se utilizan como separadores entre refractarios ácidos y básicos y también para empapar los pozos y los pisos de los hornos de forja. Los ladrillos no cocidos e hidráulicamente comprimidos se emplean mucho en las paredes de los hornos de hogar abierto. Los ladrillos de cromo se utilizan en hornos de recuperación de sulfito y, hasta cierto punto, para la refinación de metales no ferrosos. Los ladrillos básicos que combinan diversas propiedades de magnesita y cromita se hacen en la actualidad en grandes cantidades y tienen ventajas sobre cualquiera de esos materiales sólo para algunos fines.

Los **ladrillos refractarios** aislantes son una clase de ladrillos que consisten de caolín o una arcilla refractaria muy porosa. Esos ladrillos son de peso ligero (de aproximadamente la mitad a una sexta parte del peso de la arcilla refractaria), tienen baja conductividad térmica y, de todos modos, son bastante resistentes a la temperatura para utilizarse en forma adecuada en el lado caliente de la pared del horno, permitiendo paredes delgadas de baja conductividad térmica y un bajo contenido de calor. El **bajo contenido de calor** resulta particularmente valioso para el ahorro de combustible y tiempo en el calentamiento, permite cambios rápidos de la temperatura y un enfriamiento rápido. Esos ladrillos se producen en diversas formas, como, por ejemplo, mediante la mezcla de materias orgánicas con arcillas y quemarla después para eliminarlas y dejar poros, o bien, se puede incluir una estructura de burbujas en la mezcla de arcilla y agua, que se conserva posteriormente en el ladrillo refractario. Los ladrillos refractarios aisladores se clasifican en varios grupos, según el límite máximo de uso. Las gamas llegan hasta 870, 1100, 1260, 1430 y más de 1540°C (1600, 2000, 2300, 2600 y más de 2800°F).

Los refractarios aislantes se utilizan primordialmente en la industria de tratamientos térmicos, para hornos del tipo periódico. También se emplean mucho en los hornos de alivio de esfuerzo, los hornos de procesamiento químico, los alambiques o los calentadores de aceite y en las cámaras de combustión de los calentadores domésticos alimentados con aceite. Suelen tener una vida igual que la de los ladrillos pesados a los que reemplazan. Resultan particularmente adecuados para la construcción de hornos experimentales de laboratorio, porque se pueden cortar o maquinar con facilidad, para darles cualquier forma. No son resistentes a las escorias fluidas.

Hay ciertos tipos de ladrillos especiales, que se pueden obtener de productores individuales. Los **refractarios muy cocidos de caolín** son particularmente valiosos en condiciones de cargas pesadas y temperaturas muy altas o en las condiciones de astillado intenso, como en el caso de los ambientes de calderas alimentadas con petróleo a altas temperaturas o los pilares bajo hornos de esmaltado. Otro ladrillo para los mismos usos es el de cocción alta de arcilla aluminosa de Missouri.

TABLA 23-35 Aleaciones comerciales importantes para servicio en procesos a altas temperaturas

	Composición nominal, %			
	Cr	Ni	Fe	Otros
Aceros ferríticos				
Acero al carbono	....	....	Bal.	
2$^1/_4$ de cromo	2$^1/_4$	....	Bal	Mo
Tipo 502	5	....	Bal.	Mo
Tipo 410	12	....	Bal.	
Tipo 430	16	....	Bal.	
Tipo 446	27	....	Bal.	
Aceros austeníticos				
Tipo 304	18	8	Bal.	
Tipo 321	18	10	Bal.	Ti
Tipo 347	18	11	Bal.	Cb
Tipo 316	18	12	Bal.	Mo
Tipo 309	24	12	Bal.	
Tipo 310	25	20	Bal.	
Tipo 330	15	35	Bal.	
Aleaciones con base de níquel				
Níquel	....	Bal.		
Incoloy 800	21	32	Bal.	
Hastelloy B	....	Bal.	6	Mo
Hastelloy C	16	Bal.	6	W, Mo
60-15	15	Bal.	25	
Inconel 600	15	Bal.	7	
80-20	20	Bal.		
Hastelloy X	22	Bal.	19	Co, Mo
Multimet	21	20	Bal.	Co
Rene 41	19	Bal.	5	Co, Mo, Ti
Hierros colados				
Hierro dúctil	....	....	Bal.	C, Si, Mg
Ni-Resist, D-2	2	20	Bal.	Si, C
Ni-Resist, D-4	5	30	Bal.	Si, C
Inoxidable vaciado (tipos ACI)				
HC	28	4	Bal.	
HF	21	11	Bal.	
HH	26	12	Bal.	
HK	15	20	Bal.	
HT	15	35	Bal.	
HW	12	Bal.	28	
Superaleaciones				
Inconel X	15	Bal.	7	Ti, Al, Cb
A 286	15	25	Bal.	Mo, Ti
Stellite 25	20	10	Base de Co	W
Stellite 21 (colado)	27.3	2.8	Base de Co	Mo
Stellite 31 (colado)	25.2	10.5	Base de Co	W

Hay muchos ladrillos en el mercado hechos con **materiales fundidos eléctricamente**, como la mullita fundida, la alúmina fundida y la magnesita fundida. Esos ladrillos, aunque de alto costo, resultan adecuados para ciertas condiciones severas.

Los ladrillos de **carburo de silicio**, recristalizados o aglutinados por medio de arcilla, tienen una elevada conductividad térmica y se emplean en paredes protectoras para muflas y como material resistente a las escorias.

Otros tipos de refractarios utilizados son la forsterita, la circonia, y el circón. Los ladrillos resistentes a los ácidos, que consisten en un cuerpo denso similar a la loza, se utilizan para recubrir tanques y ductos en la industria química. Los bloques de carbono se usan en el extranjero como recubrimientos de crisoles de altos hornos y muy poco en Estados Unidos. Los ladrillos vaciados por fusión de mullita o alúmina se emplean mucho para recubrir tanques de vidrio.

Revestimientos aislantes de fibras de cerámica Las fibras de cerámica se producen fundiendo la misma arcilla china de sílica-alúmina (caolín) que se emplea en la fabricación de ladrillos refractarios aislantes convencionales y burbujeando aire para formar fibras de vidrio. Las fibras de 50.8 a 101.6 mm (2 a 4 in) de largo y 3 μm de diámetro se intercalan en el tejido de una manta sin aglomerantes o son

cortadas en fibras más cortas y moldeadas al vacío para obtener bloques, tablas y otras formas. Los revestimientos de fibra de cerámica que se pueden conseguir para temperaturas de 650 a 1430°C (1200 a 2600°F) son más económicos que los ladrillos de 650 a 1230°C (1200 a 2250°F). El ahorro se deriva de los costos iniciales menores, de un trabajo de instalación reducido, de 90 a 95% menos en peso y de una disminución del 25% en el consumo de combustible.

Debido a la mayor área superficial (comparada con los refractarios de cerámica sólidos), la resistencia química de las fibras es relativamente escasa. Su resistencia a los ácidos es buena, pero tienen una resistencia menor a los álcalis que la que presentan los sólidos, lo que se debe a la ausencia de agregados resistentes. También, debido a que son menos voluminosas, las fibras tienen una resistencia menor a la velocidad de los gases. Además de la ventaja del menor peso, como no retienen el calor, las fibras se enfrían más rápidamente y no presentan fallas estructurales por choques térmicos.

Refractarios monolíticos moldeables El cemento portland estándar se hace con hidróxido de calcio. Cuando se expone por encima de 427°C (800°F), los iones hidroxilo salen del portland (se elimina el agua); por debajo de 427°C (800°F) el agua se añade, y esta exposición cíclica ocasiona la falla por astillamiento. Los moldeables están hechos de aluminato de calcio (en vez de portland); en ausencia del hidróxido no están sujetas a falla cíclica por astillamiento.

Los refractarios moldeables son de tres tipos:

1. *Estándar* Con 40% de alúmina para la mayor parte de las aplicaciones a temperatura moderada.
2. *De pureza intermedia* Con 50 a 55% de alúmina. La forma anortita (estructura en agujas) es la más resistente a la exposición al vapor.
3. *Muy puro* Con 70 a 80% de alúmina, para altas temperaturas. En condiciones reductoras, el hierro en la cerámica actúa como agente controlante, ya que cataliza la conversión de CO en CO_2 más carbono, de lo que resulta el astillamiento. La elección entre los tres tipos de refractarios moldeables se hace generalmente con base en consideraciones económicas y en la temperatura que se va a aplicar.

Comparados con los ladrillos, los moldeables son menos densos, pero esto no significa que sean realmente inservibles, ya que sus cementos se pueden hidratar y formar un gel que pueden llenar los huecos en los moldeables. Los huecos demasiado grandes indicarán menos resistencia en relación con los huecos que se hayan rellenado y tienen desde luego, menor tolerancia a la velocidad de los gases. A la misma densidad de un ladrillo determinado, un moldeable resulta menos permeable.

Normalmente, los moldeables están formados por 25% de cemento y 75% de agregados. De los dos componentes, el agregado es el más resistente desde el punto de vista químico. Los materiales de mayor resistencia tienen 30% de cemento, pero demasiado cemento ocasiona gran merma en el volumen. El aislamiento refractario moldeable estándar, 1:2:4 LHV consiste en 1 volumen de cemento, 2 volúmenes de arcilla expandida (Haydite) y 4 volúmenes de vermiculita.

Los moldeables se pueden modificar por la adición de arcilla para mantener la masa intacta, permitiendo así la aplicación del material con aire a presión (gunita). Dependiendo del tamaño y la geometría del equipo, muchos recubrimientos moldeables se pueden reforzar; alambres y metales extendidos son de empleo común.

Frank L. Evan
Publishing Co.;
sociation of Con
de la sección)

Carl R. Olson,
Westinghouse E
gineers; Registe
troles de motor)

H. Steen-John
Life Fellow, Am

J. S. Swearing
of Chemical Eng
cal Society. (Tu

Eric Jenett, N
Associate Meml
Institute; Regist
de corriente de

MOT
Motores de corrien
constante . . .
Motores de indu
corriente alte
Motores sincrón
Motores de corrien
Motores de dev
Motores de polo
Motores de jaul
cuatro veloci

a altas temperaturas.
:a actúa como agente
:n CO_2 más carbono,
ntre los tres tipos de
n base en considera-
a aplicar.

; son menos densos,
ibles, ya que sus ce-
den llenar los huecos
ies indicarán menos
an rellenado y tienen
os gases. A la misma
le resulta menos per-

por 25% de cemento
l agregado es el más
materiales de mayor
do cemento ocasiona
ctario moldeable es-
ento, 2 volúmenes de
rmiculita.

lición de arcilla para
licación del material
iño y la geometría del
ueden reforzar; alam-

Sección 24

Motores eléctricos y auxiliares

Frank L. Evans, Jr., B.S.M.E., L.L.B., *Editor, Hydrocarbon Processing, Gulf Publishing Co.; Member, American Society of Mechanical Engineers, National Association of Corrosion Engineers; Registered Professional Engineer (Texas). (Editor de la sección)*

Carl R. Olson, M.S.E.E., *Staff Planning Manager, Industrial Projects Marketing, Westinghouse Electric Corp.; Member, Institute of Electrical and Electronics Engineers; Registered Professional Engineer (Pennsylvania). (Motores eléctricos y controles de motor)*

H. Steen-Johnsen, M.S.M.E.; *Chief Staff Engineer (Retired), Elliott Co.; Member, Life Fellow, American Society of Mechanical Engineers. (Turbinas de vapor)*

J. S. Swearingen, Ph.D., *President, Rotoflow Corp.; Member, American Institute of Chemical Engineers, American Society of Mechanical Engineers, American Chemical Society. (Turbinas de expansión)*

Eric Jenett, M.S.Ch.E., *Manager Process Engineering, Brown and Root, Inc.; Associate Member, American Institute of Chemical Engineers, Project Management Institute; Registered Professional Engineer (Texas). (Recuperación de energía a partir de corriente de líquido)*

MOTORES ELÉCTRICOS Y AUXILIARES

Motores de corriente alterna de velocidad constante 24-4
Motores de inducción de jaula de ardilla y corriente alterna 24-4
Motores sincrónicos de corriente alterna 24-6
Motores de corriente alterna de velocidades múltiples 24-7
Motores de devanado doble 24-7
Motores de polo consecuente y devanado sencillo 24-7
Motores de jaula de ardilla de devanado doble y cuatro velocidades 24-7
Motores de inducción de amplitud de polo modulada 24-7
Motores de corriente alterna de inducción de rotor devanado 24-7
Motores de corriente continua 24-8
Unidades motrices de velocidad ajustable 24-9
Carcasas de motores 24-10
Control del motor 24-10
Tipos de arrancadores 24-10
Protección del motor 24-12
Control especial 24-14

MÁQUINAS RECIPROCANTES O DE MOVIMIENTO ALTERNATIVO

Máquinas de vapor 24-15
Motores de combustión interna 24-16
Características de diseño 24-16
Características de operación 24-16
Instalación y costos 24-18
Generador de gas de pistón libre 24-19
Características de diseño 24-19
Características de operación 24-19
Instalación y operación 24-20

TURBINAS DE VAPOR

Tipos de turbinas de vapor 24-20
Turbina de condensación directa 24-20
Turbinas directas sin condensación 24-20
Turbina de extracción no automática, de condensación o no condensación 24-20
Turbina de extracción automática, de condensación o no condensación 24-20
Turbina de extracción e inducción automática, de condensación o no condensación 24-20
Turbina de presión mixta, de condensación o no condensación 24-20
Turbinas de recalentamiento 24-21
Opciones de etapas y válvulas 24-21
Tipos de álabes y determinación de etapas 24-21
Rendimiento y eficiencia 24-23
Cantidad de vapor 24-23
Control de turbina 24-24
Componente de un sistema de control 24-28
Sistemas de control de velocidad 24-29
Control de presión de extracción 24-30
Selección de una turbina 24-30
Ejemplo 1 24-31
Pruebas y rendimiento mecánico 24-32
Problemas de operación 24-32

TURBINAS DE COMBUSTIÓN DE GAS

Eficiencia 24-33
Opciones de diseño 24-34
Características de operación 24-35

TURBINAS DE EXPANSIÓN

Descripción del funcionamiento 24-36
Características especiales 24-37
Diseño de flujo radial 24-37
Eficiencia 24-38
Cojinetes 24-38
Cojinetes radiales 24-38
Cojinetes de empuje 24-39
Sellos 24-39
Sellos para ejes 24-39
Sellos para rotor 24-39
Boquillas variables 24-39
Resonancia del rotor 24-39
Corrientes de condensación 24-39
Aplicaciones 24-40
Lubricación 24-40
Sistema de gas de amortiguamiento 24-40
Selección del tamaño 24-41
Instrumentación 24-41

RECUPERACIÓN DE POTENCIA A PARTIR DE CORRIENTES DE LÍQUIDOS

Principios básicos 24-41
Consideraciones económicas 24-42
Desarrollo 24-42
Comportamiento hidráulico 24-42
Comportamiento de operación 24-42
Características de funcionamiento 24-43
Consideraciones de diseño 24-43
Ejemplo 2 24-43
Bases de diseño 24-45
Características de instalación 24-48
Fluidos disipables por vaporización 24-49
Volúmenes de fluido 24-49
Controles de proceso 24-49
Velocidad 24-49
Arranque y sobrecapacidad 24-49
Generación de energía eléctrica 24-49
Unidades integrales 24-50

EQUIPO MECÁNICO PARA LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Transmisiones de banda 24-50
Bandas en V 24-50
Transmisiones de cadena 24-51
Transmisiones de engranaje 24-51
Engranajes planetarios 24-51
Engranajes cónicos 24-51
Engranajes helicoidales 24-51
Transmisiones de velocidad variable 24-51
Poleas de paso variable 24-52
Transmisiones hidráulicas de velocidad variable 24-52
Control de velocidad eléctrico y electrónico 24-53
Convertidores hidráulicos del momento de torsión 24-53
Acoplamientos mecánicos 24-53
Acoplamientos flexibles 24-53
Acoplamientos desconectables 24-54
Cojinetes 24-54
Tipos de cojinetes 24-54
Cojinetes de empuje 24-55
Cojinetes de bolas y rodillos 24-55
Sistemas de lubricación 24-56

REFERENCIAS GENERALES Bartlett, *Steam Turbine Performance and Economics*, McGraw-Hill, New York, 1958. Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1967. Collins y Canaday, *Expansion Machines for Low Temperature Processes*, Oxford, Fair Lawn, N.J., 1958. Csanady, *Theory of Turbomachines*, McGraw-Hill, New York, 1964. Fink y Carroll, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 10th ed., McGraw-Hill, New York, 1968. Jennings y Rogers, *Gas Turbines Analysis and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1953. Katz *et al.*, *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1959. Rase y Barrow, *Project Engineering of Process Plants*, Wiley, New York, 1957. Salisbury, *Steam Turbines and Their Cycles*, Wiley, New York, 1950. Scott, *Cryogenic Engineering*, Van Nostrand, Princeton, N.J., 1959. Shepherd, *Principles of Turbomachinery*, Macmillan, New York, 1956. Stepanoff *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, 2d ed., Wiley, New York, 1957. Stodola, *Steam and Gas Turbines*, Peter Smith, New York, 1945.

Nomenclatura y uni

Símbolo	Definición
b	Ancho de banda
C	Constante
C_1	Velocidad de flu
c	Claro
d	Diámetro de coj
E	Voltaje aplicad
E	Módulo de elas
e	Eficiencia bruta
e	Base de los logi rales
e	Eficiencia
e_h	Eficiencia hidr
F	Carga
F_f	Fuerza de frico
f	Coeficiente de
f	Frecuencia
g	Constante gra
H	Potencia
H_c	Cambio de ent
H_i	Cambio de ent
H_p	Carga total (b
H_t	Carga total (tu
h	Espesor de la c
Δh	Cambio de en dad de mas
I	Corriente
K_A	Constante
K_L	Constante
K_S	Constante
K_T	Constante
k	Constante
Mol. wt.	Peso molecul
N	Fuerza
N_c	Eficiencia de
N_e	Eficiencia de
n	Velocidad
n_s	Velocidad es na o bomb

'ARTIR DE
S
. . . . 24-41
. . . . 24-42
. . . . 24-42
. . . . 24-42
. . . . 24-42
. . . . 24-43
. . . . 24-43
. . . . 24-43
. . . . 24-45
. . . . 24-48
. . . . 24-49
. . . . 24-49
. . . . 24-49
. . . . 24-49
. . . . 24-49
. . . . 24-49
. . . . 24-50

ÓN DE POTENCIA
. . . . 24-50
. . . . 24-50
. . . . 24-51
. . . . 24-51
. . . . 24-51
. . . . 24-51
. . . . 24-51
. . . . 24-51
. . . . 24-52
. . . . 24-52
. . . . 24-53
m 24-53
. . . . 24-53
. . . . 24-53
. . . . 24-54
. . . . 24-54
. . . . 24-54
. . . . 24-55
. . . . 24-55
. . . . 24-56

ne Performance and
er, Standard Handbook
v York, 1967. Collins y
Processes, Oxford, Fair
es, McGraw-Hill, New
ectrical Engineers, 10th
, *Gas Turbines Analysis*
l., Handbook of Natural
e y Barrow, *Project En-*
lisbury, Steam Turbines
genic Engineering, Van
Turbomachinery, Mac-
ial Flow Pumps, 2d ed.,
bines, Peter Smith, New

Nomenclatura y unidades

Símbolo	Definición	Unidades SI	Unidades usuales en Estados Unidos
b	Ancho de banda	m	in
C	Constante		
C_1	Velocidad de flujo de vapor	m/s	ft/s
c	Claro	m	ft
d	Diámetro de cojinete	m	ft
E	Voltaje aplicado	V	V
E	Módulo de elasticidad	N/m^2	lbf/ft^2
e	Eficiencia bruta de la bomba	Adimensional	Adimensional
e	Base de los logaritmos naturales		
e	Eficiencia	Adimensional	Adimensional
e_h	Eficiencia hidráulica	Adimensional	Adimensional
F	Carga		
F_f	Fuerza de fricción	N	lbf
f	Coeficiente de fricción		
f	Frecuencia	Hz	Hz
g	Constante gravitacional	m/s^2	ft/s^2
H	Potencia	W	hp
H_e	Cambio de entalpía, ideal	J	Btu
H_i	Cambio de entalpía reversible	J/kg	Btu/lb
H_p	Carga total (bomba)	m	ft
H_t	Carga total (turbina)	m	ft
h	Espesor de la capa de aceite	m	ft
Δh	Cambio de entalpía por unidad de masa	J/kg	Btu/lb
I	Corriente	A	A
K_A	Constante		
K_L	Constante		
K_S	Constante		
K_T	Constante		
k	Constante		
Mol. wt.	Peso molecular	kg/kg mol	lb/lb mol
N	Fuerza	N	lbf
N_c	Eficiencia del compresor	Adimensional	Adimensional
N_e	Eficiencia del expansor	Adimensional	Adimensional
n	Velocidad	r/s	r/min
n_s	Velocidad específica (turbina o bomba)		
P	Presión	kPa	lbf/in^2
P	Presión en el cojinete	N/m^2	lbf/ft^2
P	Potencia	kW	kW
$P_{máx}$	Presión máxima de contacto	N/m^2	lbf/ft^2
p	Número de polos		
Q_c	Calor eliminado	J	Btu
Q_p	Capacidad, bomba	m^3/h	ft^3/h
Q_t	Capacidad, turbina	m^3/h	ft^3/h
R	Carga de operación	kg	lb
R	Constante de los gases	J/(mol · K)	Btu/(mol · °R)
R	Resistencia de armadura	Ω	Ω
r	Radio	m	ft
S	Potencia aparente	kVA	kVA
$S_{máx}$	Esfuerzo máximo	N/m^2	lbf/ft^2
T	Tensión	N	lbf
T	Torsión	N · m	lbf · ft
T	Temperatura	K	°R
T_a	Temperatura promedio	K	°R
T_c	Tensión centrífuga	N	lbf
t	Tiempo	s	s
t	Espesor de banda	m	in
V	Voltaje aplicado	V	V
V	Fuerza contraelectromotriz	V	V
V_2	Velocidad de banda	m/s	ft/min
W	Trabajo neto al compresor	J	Btu
W_c	Trabajo del compresor	J	Btu
$W_{teór}$	Trabajo teórico	J	Btu
WK^2	Inercia	kg · m^2	lb · ft^2
y	Factor de potencia	Adimensional	Adimensional
Z	Viscosidad	N · s/m^2	cP
Z_a	Factor de compresibilidad promedio	Adimensional	Adimensional
	Símbolos griegos		
θ	Arco de contacto		
φ	Densidad de banda	kg/m^3	lb/in^3
Φ	Flujo de campo magnético	Wb	Wb

MOTORES ELÉCTRICOS Y AUXILIARES

Todos los motores eléctricos operan basándose en el mismo principio fundamental sea cual fuere su tipo o tamaño. Cuando un alambre o conductor porta una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético (por lo menos parcialmente perpendicular a la corriente), se genera una fuerza en el conductor, que es perpendicular tanto a la corriente como al campo magnético. En un motor, el campo magnético se irradia hacia adentro o hacia afuera del eje del motor, atravesando un espacio libre que es el espacio anular comprendido entre el rotor y el estator. Los conductores que llevan una corriente y que son paralelos al eje, tienen, entonces, una fuerza tangente a la circunferencia del rotor. La fuerza aplicada al alambre se opone a una fuerza igual (o de reacción) en el campo mangnético. No importa que el campo magnético se cree en el rotor o en el estator; el resultado neto es el mismo: el eje gira.

Según estos principios básicos, hay muchas clases de motores eléctricos. Cada una de ellas posee sus propias características de operación que se adaptan peculiarmente a aplicaciones específicas de transmisión. Las ecuaciones (24-1) a la (24-9), presentadas en la tabla 24-1, describen las características generales de operación de los motores de corrienté alterna. Cuando hay varios tipos apropiados para una aplicación, la selección se basa en el costo instalado inicial y los costos de operación (incluyendo el mantenimiento y las consideraciones del grado de seguridad posible).

TABLA 24-1 Fórmulas útiles para motores de ca

Salida de potencia

$$H = Tn/5250 \qquad (24\text{-}1)$$

$$P = 0.00173\,VIye \text{ (trifásico)} \qquad (24\text{-}2)$$

$$P = 0.001\,VIye \quad \text{(monofásico)} \qquad (24\text{-}3)$$

Entrada de potencia

$$P = 0.00173\,VIy \qquad \text{(trifásico)} \qquad (24\text{-}4)$$

$$P = 0.001\,VIy \qquad \text{(monofásico)} \qquad (24\text{-}5)$$

$$P = 0.746H/e \qquad (24\text{-}6a)$$

$$S = P/y = 0.746H/ye \qquad (24\text{-}6b)$$

Corriente de línea y factor de potencia

$$I = \frac{0.746H \text{ (salida)}}{1.73Vye} \text{ (trifásico)} \qquad (24\text{-}7)$$

$$I = \frac{0.746H \text{ (salida)}}{Vye} \text{ (entrada) (monofásico)} \qquad (24\text{-}8)$$

$$y = \frac{P \text{ (entrada)}}{S} \qquad (24\text{-}9)$$

en donde e = eficiencia decimal
H = potencia, hp
I = corriente de línea, A
n = velocidad, rpm
P = potencia, kW
S = potencia aparente en kVA
T = par de torsión, lbf · ft
V = voltaje aplicado, V
y = factor de potencia, decimal

NOTA: Para convertir caballos de fuerza (hp) en watts, multiplíquese por 746; para convertir libra-fuerza-pies en newton-metros, multiplíquese por 1.356, y para convertir revoluciones por minuto en radianes por segundo multiplíquese por 0.1047.

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA DE VELOCIDAD CONSTANTE

La mayor parte de las unidades motrices industriales son de velocidad constante. Entre las aplicaciones usuales se pueden citar:

Bombas
Compresores
Ventiladores
Transportadores
Trituradores y molinos

Motores de inducción de jaula de ardilla y corriente alterna Estos motores son, por mucho, las unidades de velocidad constante de empleo más común. Su diseño es relativamente simple y, por ende, el costo es bajo y el grado de seguridad muy alto. En la figura 24-1 se ilustran los precios representativos para varias velocidades y caballajes.

El motor trifásico usual en jaula de ardilla tiene devanados de estator que se conectan a la fuente de energía. El rotor es una estructura cilíndrica magnética montada sobre el eje, con ranuras en la superficie, que son paralelas (o ligeramente inclinadas) en relación con el eje; las barras se insertan en dichas ranuras o se fabrican con metal fundido colándolas en su sitio, y se conectan mediante un anillo extremo para cortocircuito que se coloca en ambas terminaciones del rotor. El nombre de "jaula de ardilla" se deriva de la construcción de las barras del rotor. Cuando está funcionando, la corriente pasa por el devanado del estator creando un campo magnético giratorio que corta el devanado del rotor, a menos que éste gire en forma exactamente sincrónica con el campo del estator. Esta acción de corte induce un voltaje y, en consecuencia, una corriente que, a su vez, reacciona con el campo magnético para generar un par de fuerza.

El motor en jaula de ardilla de tamaño mediano usual se diseña para operar entre 2 y 3% de deslizamiento (97 a 98% de la velocidad sincrónica). La **velocidad sincrónica** se determina según la frecuencia del sistema de potencia y la configuración del devanado del estator. Si éste está devanado de tal manera que produzca un polo magnético norte y otro sur, el motor se clasifica como de dos polos; siempre se tiene un número par de polos (2, 4, 6, 8, etc.). La velocidad sincrónica es:

$$n = 120\,f/p \qquad (24\text{-}10)$$

en donde n = velocidad, rpm
f = frecuencia, hertz (ciclos/s)
p = número de polos

La velocidad de operación real es ligeramente menor, por la diferencia debida al deslizamiento. El **deslizamiento**, o movimiento, depende del tamaño del motor y la aplicación. Por ejemplo, cuanto más grande sea el motor, tanto menor será el deslizamiento; un motor ordinario de 7460-W (10 hp) puede tener 2.5% de deslizamiento, en tanto que motores con más de 746 kW (1000 hp) tendrán menos de 0.5%. Los motores de alto deslizamiento (hasta un 13%) se utilizan para aplicaciones de mucha inercia que requieren un gran par de arranque; entre las aplicaciones usuales están las prensas troqueladoras y algunos trituradores. En la figura 24-2 se ilustran algunas curvas típicas de velocidad en función del par de fuerza angular (llamado también par motor, esfuerzo de rotación, esfuerzo de torsión, par motor, par de torsión, par de fuerza angular y momento de torsión o angular) correspondientes a diversos diseños NEMA (National Electrical Manufacturers Association) de motores (hasta de 200 hp). En la tabla 24-2 se estipulan varias características y aplicaciones comunes para esos motores.

El **control** o **arrancador** de los motores de inducción de jaula de ardilla consiste normalmente en aplicar un voltaje pleno a las terminales del mismo. Las curvas de velocidad-par que se muestran en la figura 24-2 se basan en la aplicación de un voltaje pleno en toda la gama de velocidad, desde el arranque hasta el funcionamiento normal. El diseño específico de motor determina la cantidad de corriente de arranque; sin embargo, si el motor tiene un diseño estándar típico (NEMA A o B),

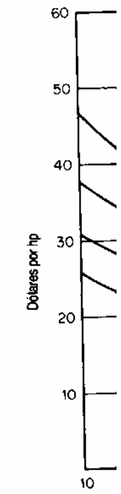


FIG. 24-1 Pre
estándard, los mo
datos se basan en
multiplíquese pc

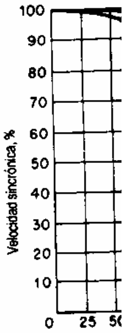


FIG. 24-2 Curvas usu
diseños NEMA de mot
en donde se da una expl

la corriente se calcul
aplicando el voltaje
des, esta corriente d
voltaje indeseable q
la brillantez de las l
ciente del control c
ciones, se tienen va
1. *Arranque con*
mente un reactor, u
tor durante el arran
limitar la reducción
ción en el par de arr
par disminuye com

y corriente alterna
velocidad constante
nte simple y, por en-
uy alto. En la figura
a varias velocidades

devanados de estator
una estructura cilín-
s en la superficie, que
ión con el eje; las ba-
on metal fundido co-
anillo extremo para
nes del rotor. El nom-
ción de las barras del
asa por el devanado
que corta el devana-
ctamente sincrónica
duce un voltaje y, en
cciona con el campo

usual se diseña para
e la velocidad sincró-
gún la frecuencia del
ido del estator. Si éste
lo magnético norte y
; siempre se tiene un
d sincrónica es:

(24-10)

menor, por la diferen-
movimiento, depen-
plo, cuanto más gran-
o; un motor ordinario
imiento, en tanto que
menos de 0.5%. Los
utilizan para aplica-
ar de arranque; entre
ladoras y algunos tri-
urvas típicas de velo-
do también par motor,
tor, par de torsión, par
r) correspondientes a
nufacturers Associa-
-2 se estipulan varias
motores.
inducción de jaula de
e pleno a las termina-
e muestran en la figu-
no en toda la gama de
iento normal. El dise-
corriente de arranque;
típico (NEMA A o B),

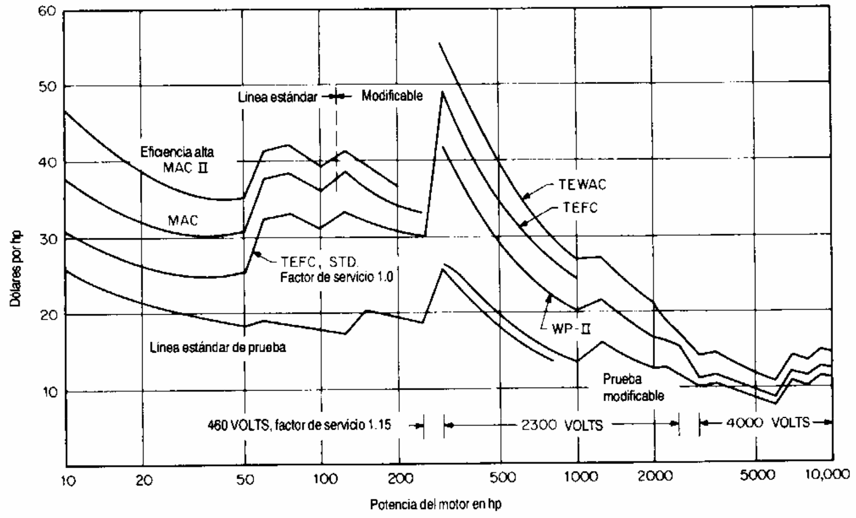


FIG. 24-1 Precios de motores en dólares por hp para motores de inducción de jaula de ardilla de 1800 rpm, desde 10 a 10 000 hp. Excepto para TECF stándard, los motores mostrados de 10 a 250 hp cuentan con factor de servicio; para valores de hp superiores a 250, el factor de servicio será 1.0. Estos datos se basan en la fecha de junio de 1979. Para convertir dólares por hp en dólares por kilowatt, multiplíquese por 1.340; para convertir hp en kilowatts, multiplíquese por 0.746.

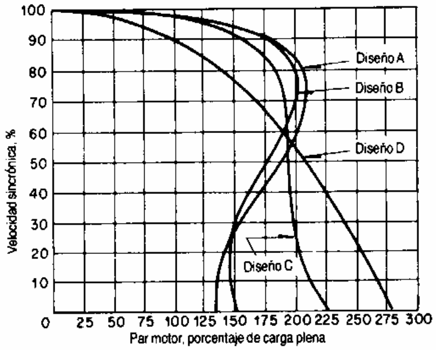


FIG. 24-2 Curvas usuales de velocidad en función del par de torsión para varios diseños NEMA de motores de inducción en jaula de ardilla. (Véase la Tabla 24-2, en donde se da una explicación de los tipos de diseño.)

la corriente se calcula entre 6 y 6.5 veces la corriente a carga completa, aplicando el voltaje pleno. Sobre todo cuando se trata de motores grandes, esta corriente de arranque de entrada puede causar un descenso de voltaje indeseable que apague otros equipos, reduzca temporalmente la brillantez de las luces o provoque incluso el funcionamiento deficiente del control complejo del sistema de energía. Para estas condiciones, se tienen varias alternativas.

1. *Arranque con voltaje reducido.* Cuando se conecta temporalmente un reactor, una resistencia o un transformador antes que el motor durante el arranque, con el fin de reducir la entrada de corriente y limitar la reducción del voltaje. Esto va acompañado de una disminución en el par de arranque. Para un arranque de reactor o resistencia, el par disminuye como el cuadrado de la corriente; para un arranque de

TABLA 24-2 Características y aplicaciones usuales de motores de inducción de jaula de ardilla

	NEMA A y B	NEMA C	NEMA D
Par motor de arranque	Normal	Alto	Alto
Deslizamiento de marcha	Bajo	Bajo a mediano	Alto
Aplicaciones	Bombas	Escaleras eléctricas	Prensas estampadoras
	Compresores	Pulverizadores	Trituradoras
	Ventiladores	Transportadores	
	Máquinas herramienta		
	Uso general		

transformador, el par decrece directamente en función de la corriente de línea. El reactor, la resistencia o el transformador se pueden ajustar para dar el equilibrio apropiado entre el par y la corriente.

2. *Arranque en estrella-delta.* Un motor conectado en delta se vuelve a conectar en estrella para el arranque; así se aplica 57.7% de voltaje a cada devanado de fase. Esto genera el desarrollo del par de $(0.577)^2$ o sólo 33%. No existen medios de ajuste; por lo que este método sólo se emplea para cargas que requieren menos de 1/3 de los pares normales de arranque y aceleración del motor. En Estados Unidos se emplea sólo en raras ocasiones.

3. *Arranque de devanado parcial.* Este método utiliza un motor con dos conjuntos de devanado, uno sólo de los cuales se energiza durante el arranque. El par y la corriente son de, aproximadamente, el 50%. En este caso se necesitan dos contactores pequeños (interruptores de arranque) que se emplean en lugar de uno solo de mayor tamaño, y no se necesitan reactores o transformadores. Las desventajas son el valor fijo del par disponible y las perturbaciones armónicas originadas en un

posible desequilibrio de devanado que provoca desviaciones en la curva de velocidad -par y, por tanto, una falla posible en la aceleración.

El **frenado** y la **inversión del sentido de rotación** son posibles con motores de jaula de ardilla. La dirección de rotación se determina a través de la secuencia o la rotación de fase de la fuente de energía. Si se intercambian dos cables de un motor trifásico, la rotación se invertirá. Cuando esto sucede durante el funcionamiento, el motor se detiene con gran rapidez e invierte su sentido de rotación. La potencia se anula al detenerse para lograr un frenado eficaz. Se considera que este par de alto o detención y la inversión de rotación sólo es para fines de cálculo, aproximadamente igual al par de arranque. El tiempo de frenado se determina aplicando la expresión

$$t = WK^2\, n/308T \qquad (24\text{-}11)$$

en donde t = tiempo, s
WK^2 = inercia, lb · ft²
n = velocidad de funcionamiento, rpm
T = momento de torsión, lbf · ft

Para convertir libra-pie cuadrado a kilogramo-metro cuadrado, multiplíquese por 0.0421; para convertir revoluciones por minuto a radianes por segundo, multiplíquese por 0.1047; y para convertir libras fuerza-pie a Newton-metro multiplíquese por 1.356.

Estas estimaciones son con frecuencia inexactas debido a los efectos de segundo orden, como la saturación del rotor y los armónicos. Si la aplicación es de gran importancia, debe consultarse al fabricante del motor.

El frenado regenerativo ocurre con velocidades superiores a la del motor sincrónico que se genera debido a una carga excesiva o al pasar de una velocidad alta a otra baja, en motores de velocidades múltiples. La acción es similar a la operación de un motor normal, excepto que el deslizamiento es negativo. El motor actúa como generador inductor suministrando energía a la fuente de potencia. Si se dispone de una fuente de potencia, como por ejemplo, un expansor de gas o un transportador en pendiente, el frenado de inversión es un método eficaz para regular la velocidad, conservar energía y poner en funcionamiento la máquina que se mueve o la que proporciona el movimiento. Un generador de inducción puede suministrar potencia a la fuente a un nivel más o menos igual que su valor nominal como motor. El frenado de inversión de rotación se utiliza sólo en sistemas de potencia capaces de absorber la energía generada y de suministrar la excitación de magnetización (potencia reactiva) para el motor.

El frenado dinámico en corriente continua (cc) utiliza corriente continua aplicada al devanado del estator. La energía en corriente alterna (ca) se elimina inicialmente abriendo el contactor o arrancador del motor; a continuación se aplica cc por medio de un segundo contactor. La cc produce un flujo magnético estacionario en contraste con el campo de ca rotatorio normal. Las barras del rotor cortan este campo induciendo corrientes que reaccionan con el flujo de cc para desarrollar el par de frenado. El esfuerzo de frenado varía fácilmente ajustando la cantidad de corriente directa. Una característica conveniente de este método para motores estándares es el esfuerzo de frenado relativamente ligero con una velocidad de carga plena, reduciendo el impacto; además, el esfuerzo de frenado aumenta típicamente al descender la velocidad, alcanzando un valor máximo cerca de cero. El par de frenado en una posición de alto o detención es cero; sin embargo, el par máximo ocurre con una velocidad tan baja que la fricción estática es, casi siempre, suficiente para evitar la marcha sin motor. Los pares de frenado de pico o máximos pueden ser altos, de manera que es conveniente verificar los ejes, los engranajes, los acoplamientos, etc. Debe tenerse gran precaución, ya que el frecuente arranque y frenado generan un calentamiento excesivo.

Motores sincrónicos de corriente alterna Estos motores funcionan siguiendo un sincronismo de reloj exacto con el sistema de potencia. Para la mayor parte de los sistemas de potencia modernos, éstos son verdaderamente motores de velocidad constante.

En el motor sincrónico normal, se desarrolla un campo magnético giratorio gracias a las corrientes de estator, como sucede en los motores de inducción. No obstante, el rotor es distinto y consiste usualmente en pares de electroimanes (polos) espaciados en torno a la periferia del rotor. El campo del rotor corresponde al que produce el estator de ca que tiene la misma cantidad de polos. El rotor o las bobinas de campo se alimentan con corriente continua, por lo que el campo magnético es estacionario con respecto a la estructura del rotor. El par motor se desarrolla por interacción del campo magnético del rotor y la corriente del estator (componente en fase). En condiciones sin carga y con una corriente de campo en cc apropiada, los centros del campo magnético del rotor y el estator coinciden. El voltaje aplicado al devanado del estator se equilibra mediante un voltaje opuesto que genera el campo del rotor (inducido) en el estator, y no fluye ninguna corriente alterna. Al aplicar la carga, el rotor tiende a desacelerarse, haciendo que cambie la posición del rotor con respecto al campo de ca. Este cambio produce una diferencia entre el voltaje aplicado y el inducido; la diferencia de voltaje genera un flujo de corriente, y ésta reacciona con el flujo magnético del rotor generando el esfuerzo de rotación.

Los motores sincrónicos no se pueden poner en marcha cuando se aplica un campo de cc. Por el contrario, se arrancan como motores de inducción; las barras, que actúan como rotor en jaula de ardilla, están insertadas en la superficie del polo de campo y se conectan por medio de anillos terminales en ambos extremos del rotor. Estas barras de amortiguador sirven también para suavizar las oscilaciones en condiciones normales de funcionamiento. Cuando el motor desarrolla, aproximadamente, el 95% de velocidad (según la aplicación y el diseño del mismo), se aplica una cc al campo y el motor toma su paso (sincronismo). Puesto que las barras del amortiguador no afectan las características de la velocidad sincrónica, se diseñan para un funcionamiento de arranque. Esto proporciona flexibilidad a las características de aceleración para que satisfagan requisitos de aplicación específicos, sin afectar la eficiencia de funcionamiento y otras características de la velocidad sincrónica. Por otro lado, el diseño del rotor de un motor en jaula de ardilla debe ser un punto medio entre el funcionamiento de arranque y el de corrida normal. En general, el campo de cc se pone en corto circuito mediante una resistencia, durante el arranque, y contribuye al par de aceleración, sobre todo cerca de la velocidad sincrónica.

La **corrección del factor de potencia** es una característica importante de los motores sincrónicos. Los factores de potencia de motores sincrónicos normales son de 100 y 80% de adelanto. Las máquinas con factor de potencia de adelanto se emplean con frecuencia para corregir el factor de potencia con retardación o demora de la carga de planta restante (p. ej., motores de inducción), evitando cargas onerosas en las facturas de consumo eléctrico. Incluso los motores con un factor de potencia de 100% pueden operar con adelanto a cargas reducidas. Una ventaja de los motores sincrónicos más que de los capacitores, es su tendencia inherente a regular el voltaje del sistema de alimentación; conforme desciende el voltaje, se suministra una mayor cantidad de energía reactiva al sistema de potencia y, por el contrario, al aumentar el voltaje, el motor genera menos potencia reactiva. En contraste, la potencia reactiva de capacitor disminuye directamente en proporción con la caída de voltaje al cuadrado. La cantidad de potencia reactiva de adelanto suministrada al sistema, depende de la corriente de campo en cc que se pueda ajustar con facilidad.

La corriente de campo es un elemento de control importante, ya que no sólo regula el factor de potencia, sino también el par de salida (la carga a la que el motor sale de sincronía). Por ejemplo, el refuerzo del campo evita una salida de sincronía a cargas transitorias elevadas o pérdidas de voltaje anticipadas. Las cargas que tienen pares transitorios elevados conocidos se impulsan a menudo con motores sincrónicos con un factor de potencia del 80%. El campo adicional necesario suministra tanto el par de salida adicional como la corrección del factor de potencia para el sistema. Cuando se requiere un par de salida elevado, la máquina con factor de potencia de adelanto es, con frecuencia, menos costosa que un motor con factor de potencia de unidad, con la misma capacidad de esfuerzo de rotación.

La **excitación de campo en cc** se suministra por diversos métodos. A menudo se emplea un generador (excitador) de cc, ya sea directamente acoplado al eje del motor, a un eje impulsado por banda fuera del motor (rara vez utilizado), o impulsado por un pequeño motor in-

dependiente (conjunt
dores de acoplamien
siempre con un solo
campo excitador. Los
tor y un generador pu
tores sincrónicos. Pa
combinaciones de m
campos de motores n
excitador es, casi sie
los motores sincróni
tos de campo de mo
campo del excitado
(rectificadores) para
necesitan rectificado
por sobretensiones c
mencionados antes,
llas y anillos colecto
rotatorio.

Otro concepto imp
un generador de ca (e
o se monta sobre él. I
armadura de rotor de
estático controlable
en el eje). Los eleme
de sincronización, el
tor, como sucede co
el campo del excita
necesidad de utiliza
escobillas es apropi
donde los motores n
tectoras para las esc

Debido al diseño
alimentación para e
siempre, sólo a gran
de caballos de pote
sincrónicos con má

Con su amplitud
potencia inherente
a una gran variedad
o cojinete) se empl
cantes y de baja ve
usuales, están los m
bolas y rodillos, pic
las velocidades baj
rior está limitada p
El límite aproxima
1200 rpm es 29 84
Las velocidades
10). Es factible obt
medio de engranes
de alta velocidad.
de dos polos (3600
paración con las tr

MOTORES DE VELOCIDADE

Los motores de in
mente de una sola
varias velocidades
tores diseñados pa

Motores de de
to más sencillo. L
fásico o bifásico)
polos. Por ejemp
(1800 rpm a 60 h

:n torno a la periferia
produce el estator de
) las bobinas de cam-
el campo magnético
otor. El par motor se
el rotor y la corriente
s sin carga y con una
lel campo magnético
ado al devanado del
que genera el campo
ına corriente alterna.
:, haciendo que cam-
ca. Este cambio pro-
inducido; la diferen-
reacciona con el flujo
ación.
en marcha cuando se
can como motores de
aula de ardilla, están
: conectan por medio
otor. Estas barras de
ilaciones en condicio-
or desarrolla, aproxi-
ación y el diseño del
ıa su paso (sincronis-
ıfectan las caracterís-
m funcionamiento de
acterísticas de acele-
ción específicos, sin
racterísticas de la ve-
rotor de un motor en
el funcionamiento de
ampo de cc se pone en
el arranque, y contri-
velocidad sincrónica.
característica impor-
; potencia de motores
ito. Las máquinas con
ecuencia para corregir
de la carga de planta
cargas onerosas en las
ores con un factor de
cargas reducidas. Una
los capacitores, es su
ema de alimentación;
ıa mayor cantidad de
contrario, al aumentar
ativa. En contraste, la
amente en proporción
le potencia reactiva de
corriente de campo en

rol importante, ya que
én el par de salida (la
emplo, el refuerzo del
ransitorias elevadas o
tienen pares transito-
con motores sincróni-
o adicional necesario
a corrección del factor
un par de salida eleva-
ito es, con frecuencia,
ncia de unidad, con la

por diversos métodos.
de cc, ya sea directa-
lsado por banda fuera
un pequeño motor in-

dependiente (conjunto de motor excitador-generador). Los excitadores de acoplamiento directo o impulsados por banda se asocian siempre con un solo motor, y se controlan mediante el ajuste del campo excitador. Los conjuntos excitadores compuestos por un motor y un generador pueden proporcionar uno o más campos para motores sincrónicos. Para mayor seguridad, es factible conectar varias combinaciones de motor-generador en paralelo, para abastecer campos de motores múltiples; en tales circunstancias, el voltaje del excitador es, casi siempre, fijo (p. ej., 125 o 250 V), y los campos de los motores sincrónicos individuales se controlan mediante reóstatos de campo de motor (mucho más grandes que los reóstatos de campo del excitador). También se utilizan excitadores estáticos (rectificadores) para la excitación de un solo o varios motores; se necesitan rectificadores especiales para evitar los daños causados por sobretensiones durante la salida de sincronía. Los excitadores mencionados antes, ya sean rotatorios o estáticos, requieren escobillas y anillos colectores para conducir la cc a la estructura del campo rotatorio.

Otro concepto importante es la **excitación sin escobillas**, en donde un generador de ca (excitador) se acopla directamente al eje del motor o se monta sobre él. El excitador de ca tiene un campo de estator y una armadura de rotor de ca que se conecta directamente a un rectificador estático controlable sobre el rotor del motor (o a un tambor montado en el eje). Los elementos de control estático (para detectar la velocidad de sincronización, el ángulo de fase, etc.) se montan también en el rotor, como sucede con la resistencia de descarga del campo. Al cambiar el campo del excitador se ajusta la corriente de campo del motor, sin necesidad de utilizar escobillas o anillos colectores. La excitación sin escobillas es apropiada para utilizarse en atmósferas peligrosas, en donde los motores normales de escobillas deben tener cubiertas protectoras para las escobillas y los anillos colectores.

Debido al diseño más complejo y a la necesidad de una fuente de alimentación para el campo, los motores sincrónicos se aplican, casi siempre, sólo a grandes valores nominales de caballaje [varios cientos de caballos de potencia (hp) o más aún]; se han construido motores sincrónicos con más de 59 680 kW (80 000 hp).

Con su amplitud de tamaños y características, y su gran factor de potencia inherente y su eficiencia, los motores sincrónicos se aplican a una gran variedad de sistemas de transmisión. El tipo motor (sin eje o cojinete) se emplea casi exclusivamente para compresores reciprocantes y de baja velocidad y gran tamaño. Entre otras aplicaciones usuales, están los motores Jordan, compresoras, bombas, molinos de bolas y rodillos, picadoras, trituradoras y moledoras. Se considera que las velocidades bajas hasta de 80 rpm son prácticas; la velocidad superior está limitada por la estructura del rotor y depende de la potencia. El límite aproximado para 1800 rpm es de 2238 kW (3000 hp); para 1200 rpm es 29 840 kW (40 000 hp).

Las velocidades sincrónicas se calculan aplicando la ecuación (24-10). Es factible obtener velocidades superiores a los límites dados por medio de engranes de aumento; por ejemplo, compresores centrífugos de alta velocidad. También es factible construir motores sincrónicos de dos polos (3600 rpm a 60 hertz); pero son poco económicos en comparación con las transmisiones de engranes.

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA DE VELOCIDADES MÚLTIPLES

Los motores de inducción de jaula de ardilla son máquinas inherentemente de una sola velocidad. No obstante, se logra una operación de varias velocidades reconectando los devanados del estator de los motores diseñados para este fin.

Motores de devanado doble Estos motores ilustran el concepto más sencillo. Los dos devanados de estator individuales (sólo trifásico o bifásico) se diseñan y arrollan para un número distinto de polos. Por ejemplo, puede ser que un devanado tenga cuatro polos (1800 rpm a 60 hertz) y el otro seis polos (1200 rpm a 60 hertz). Sólo un devanado se conecta a la vez y este método se utiliza para razones de velocidad que no sean de 2 a 1. Puesto que los dos devanados son independientes, es factible lograr gran cantidad de combinaciones de velocidad. No es necesario que los dos devanados tengan la misma capacidad.

Se pueden construir motores de doble devanado para par constante, par variable o potencia constante. Los motores de potencia constante son capaces de manejar la misma potencia con ambas velocidades (es decir, un par más alto con la velocidad más baja). Los motores de par constante manejan el mismo par de carga con ambas velocidades (p. ej., los impulsores de transportador). Los motores de par variable se diseñan para cargas en que el par de carga varía como el cuadrado de la velocidad, y la potencia varía como el cubo de la velocidad. Las aplicaciones usuales son:

Par de motor variable	Par de motor constante	Potencia constante
Ventiladores	Transportadores	Máquinas-herramientas
Bombas centrífugas	Alimentadores	
	Compresores reciprocantes	

Motores de polo consecuente y devanado sencillo Estos motores se utilizan cuando la velocidad baja es la mitad de la alta. Esto se produce sólo en unidades trifásicas. El devanado de diseño especial se reagrupa mediante una reconexión externa (control del motor) para obtener la velocidad deseada. Este método permite obtener sólo una razón de velocidad de 2 a 1; se obtienen velocidades del orden de 3600/1800, 1800/900 y 1200/600. Existen diseños de par variable, par constante y potencia o caballaje constante, con características de par como las que se vieron con anterioridad en "Motores de devanado doble". El control de motores de un solo devanado y dos velocidades es más complejo que el control de dos devanados.

Motores de jaula de ardilla de devanado doble y cuatro velocidades Estos motores se construyen combinando los dos métodos anteriores. El devanado del estator se compone de devanado doble de polo consecuente, en donde cada devanado da dos velocidades con una relación de 2 a 1 entre sí. Las combinaciones de velocidad estándar a 60 hertz son 1800/1200/900/600 rpm y 1200/900/600/450 rpm. Los tres diseños de par-capacidad, de par variable, par constante y caballaje constante se encuentran también en estos motores de cuatro velocidades.

Motores de inducción de amplitud de polo modulada Éstos son unidades de jaula de ardilla con un solo devanado y cualquier combinación de polos o velocidades (p. ej., 8/10 polos o 900/720 rpm o bien, con anchuras como 4/20 polos o 1800/360 rpm). Esos motores son más pequeños y ligeros que las máquinas de dos devanados equivalentes. El devanado completo funciona tanto con alta como con baja velocidad, lo cual da como resultado una capacidad térmica mayor y una eficiencia más alta. El principio básico es que cuando una frecuencia actúa (modula) en otra se generan nuevas frecuencias equivalentes a la suma y la diferencia de las dos. Por lo tanto, un campo de 6 polos modulado por un campo de 2 polos produce un campo de cuatro y otro de ocho polos. El campo de cuatro polos se elimina mediante una geometría adecuada de devanado. Este motor funciona con la velocidad de 6 polos (1200 rpm, 60 hertz) cuando se conecta normalmente y con una velocidad de ocho polos (900 rpm) cuando la mitad de las bobinas se invierten para producir la modulación de dos polos.

En la exposición anterior sobre los motores de ca y velocidades múltiples, se observará que sólo se tomaron en cuenta los motores de inducción. Éstos no tienen polos de rotor físicos y discretos; así, lo único que se puede modificar para cambiar la velocidad es la configuración del polo del estator. Para un funcionamiento de velocidades múltiples, un motor sincrónico requerirá una estructura de rotor específica para cada velocidad. Por consiguiente, la velocidad múltiple sólo es práctica para motores de inducción de jaula de ardilla.

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

Los motores de inducción de rotor devanado funcionan basándose en el mismo principio que los de jaula de ardilla. No obstante, como su nombre implica, el rotor posee devanados en lugar de barras y éstos se conectan a los anillos colectores que van montados sobre el eje. Las escobillas que van sobre los anillos colectores se conectan a una resistencia externa o se ponen en corto circuito. Los motores de rotor devanado tienen una dimensión adicional de flexibilidad en la **variabilidad de la resistencia externa del rotor**. La resistencia de rotor afecta la forma de la curva de velocidad-par; al aumentar la resistencia disminuye la velocidad con que se produce el par máximo. En la figura 24-3 se ilustra este efecto, conforme la resistencia se incrementa de un valor cero externo (en la parte superior) hasta un valor muy alto (extrema izquierda).

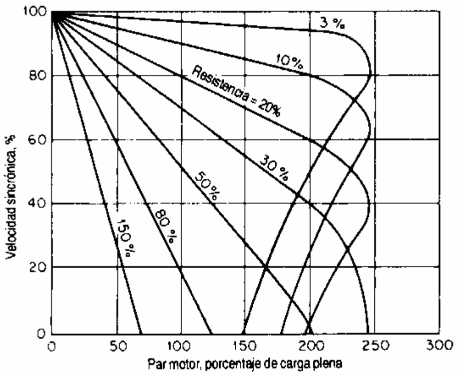


FIG. 24-3 Curvas usuales de velocidad en función del par de torsión para un motor de inducción de rotor devanado, con diferentes cantidades de resistencia secundaria (rotor) externa. Los valores de resistencia se basan en la resistencia a 100% de par y velocidad cero = 100%.

El funcionamiento con menor velocidad reduce la eficiencia. **La eficiencia** es, aproximadamente, igual que la velocidad expresada como un porcentaje de la velocidad sincrónica. Por lo tanto, al 75% de velocidad, aproximadamente 3/4 de la entrada del motor pasa a la carga, mientras que el otro 1/4 se disipa en la resistencia del rotor. La magnitud de la resistencia externa se determina de tal manera, que se elimina este calor. Es más, al acelerar una carga hasta la velocidad de funcionamiento, el calor generado en la resistencia del rotor es igual que la energía necesaria para acelerar la carga (inercia + fricción). La resistencia de rotor (interna o externa) debe tener la capacidad de almacenar este calor, ya que el tiempo de aceleración es, casi siempre, demasiado breve, para permitir alguna disipación de calor sustancial.

Esas características de los motores de rotor devanado determinan su **campo de aplicación**. Pueden acelerar cargas extraordinarias de inercia como las que se encuentran en trituradores, que utilizan gran resistencia externa para absorber el calor. Las cargas sensibles a los pares de choque y aceleración se pueden acelerar también con suavidad, insertando una gran resistencia de rotor de arranque; por ejemplo, este efecto se utiliza para absorber el juego de los engranajes. Los rotores devanados se emplean también para manejar cargas como prensas de perforación y trituradoras de carretilla, en donde las cargas extremas de tipo transitorio se proporcionan a través de la inercia del sistema mecánico, lo cual permite que el sistema reduzca su velocidad durante tales picos o máximos; la resistencia permanente del rotor externo proporciona esta característica suave. Los motores de rotor devanado se emplean también para impulsar transmisiones de velocidad ajustable para bombas, grúas y otras cargas en donde no se requiere una regulación precisa de la velocidad. Las pérdidas de velocidad reducida no son demasiado importantes para cargas de bombas; el porcentaje de eficiencia es bajo con velocidad reducida, pero el esfuerzo de rotación y el caballaje de carga disminuye con rapidez. Si el esfuerzo de rotación es proporcional a la velocidad al cuadrado, las máximas pérdidas de resistencia de rotor no excederán jamás 10.5% de la carga con velocidad plena (que ocurre al 70% de velocidad y eficiencia, 50% de par, 35% de potencia de carga, y 30% de pérdidas, en donde, el 10.5% de pérdidas se basa en la carga plena con la velocidad máxima).

Como se vio antes, **el control de los motores de rotor devanado** se realiza mediante el ajuste de la resistencia secundaria externa (rotor), ya sea en etapas o en forma continua, mediante un reóstato líquido (que rara vez se emplea). Por lo común, cuando se hace variar una resistencia secundaria para ajustar la velocidad o el par de fuerza angular o para controlar la aceleración, se utilizan varias etapas de resistencia. Estas etapas de resistencia se conmutan en forma manual (casi siempre por medio de un conmutador de tambor), o bien, en forma eléctrica, mediante un contactor.

Además del control de la resistencia secundaria, se emplean otros dispositivos, como reactores y tiristores (rectificadores controlables de estado sólido), para regular los motores de rotor devanado. Cuando se combinan reactores secundarios fijos con resistencia, se proporciona un par de aceleración muy constante con un mínimo de etapas de aceleración. El cambio en la frecuencia de deslizamiento en función de la velocidad altera continuamente la reactancia eficaz y, por tanto, el valor de la resistencia asociada con el reactor. Los reactores secundarios, las resistencias y los contactos pueden alterarse en su diseño, con el fin de proporcionar la curva de velocidad de aceleración apropiada para proteger los transportadores de banda y las cargas similares.

Los **reactores saturados** que se ajustan mediante una pequeña señal de cc se han utilizado tanto para el control primario (estator) como para el secundario (rotor). En el primario, controlan el voltaje de motor y, por ende, el par o momento de torsión. En combinación con resistencias secundarias fijas y retroalimentación del tacómetro, este sistema se utiliza para el control preciso de velocidad y esfuerzo de rotación de grúas, montacargas, etc. Incluso la inversión se logra utilizando dos reactores saturables en dos (de las tres) fases. Otras combinaciones de reactores fijos o saturables en el primario o en el secundario, en combinación con resistencias secundarias, ofrecen una gama amplia de capacidades y flexibilidades para el motor de rotor devanado.

En años recientes, los **tiristores** han reemplazado a los reactores saturables; se trata de unidades pequeñas, eficientes y fácilmente controlables a través de gran variedad de sistemas de control. Un motor de control de grúa de tipo moderno utiliza resistencias secundarias fijas y dos juegos de tiristores primarios (uno para elevación y el otro para descenso). Con la retroalimentación de tacómetro para detectar la velocidad, el control del motor proporciona la regulación de velocidad y la limitación del esfuerzo de rotación en ambas direcciones, todo ello con dispositivos estáticos. Se dispone de una amplísima variedad de sistemas de control, y esto se debe diseñar para cada aplicación específica.

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Los motores de corriente continua tienen velocidades ajustables en una gama amplia. Más aún, gozan de alta eficiencia en toda la gama de velocidades, contrariamente a lo que sucede con los motores de rotor devanado en los cuales la eficiencia es más o menos proporcional a la velocidad. Esa flexibilidad se logra a expensas de una mayor complejidad y un costo más elevado.

Los campos del motor de cc se localizan en el estator. El rotor es la armadura y el campo magnético no gira como el campo en las máqui-

: rotor devanado se
velocidad ajustable
equiere una regula-
dad reducida no son
l porcentaje de efi-
uerzo de rotación y
sfuerzo de rotación
áximas pérdidas de
la carga con veloci-
iencia, 50% de par,
donde, el 10.5% de
l máxima).
rotor devanado se
aria externa (rotor),
eóstato líquido (que
variar una resisten-
uerza angular o para
le resistencia. Estas
al (casi siempre por
orma eléctrica, me-

ia, se emplean otros
adores controlables
r devanado. Cuando
encia, se proporcio-
nínimo de etapas de
amiento en función
a eficaz y, por tanto,
Los reactores secun-
erarse en su diseño,
le aceleración apro-
las cargas similares.
nte una pequeña se-
nario (estator) como
n el voltaje de motor
inación con resisten-
ómetro, este sistema
uerzo de rotación de
logra utilizando dos
as combinaciones de
secundario, en com-
a gama amplia de ca-
devanado.
zado a los reactores
es y fácilmente con-
control. Un motor de
as secundarias fijas y
ración y el otro para
o para detectar la ve-
ación de velocidad y
irecciones, todo ello
mplísima variedad de
ada aplicación espe-

UA

idades ajustables en
ia en toda la gama de
los motores de rotor
nos proporcional a la
: una mayor comple-

estator. El rotor es la
campo en las máqui-

nas de ca. La corriente de la armadura reacciona con el campo del estator para producir el par de rotación.

Los devanados de la armadura generan un voltaje opuesto al aplicado cuando cortan el campo magnético. La diferencia entre el voltaje de terminal y el voltaje generado (fuerza contraelectromotriz), aplicado a la resistencia de la armadura, genera una corriente de armadura. El par de fuerza angular es proporcional a la corriente de armadura y el flujo magnético. La fuerza contra electromotriz es casi igual que el voltaje aplicado; de modo que la velocidad puede variar, cambiando el voltaje aplicado; la velocidad también varía alterando la corriente de campo.

$$E = V + IR \quad \text{o} \quad I = (E - V)/R \qquad (24\text{-}12)$$
$$V = kn\phi \qquad (24\text{-}13)$$

en donde E = voltaje aplicado, V
V = fuerza contraelectromotriz (voltaje generado), V
R = resistencia de armadura, Ω
I = corriente de armadura, A
k = constante dependiente del diseño del motor
n = velocidad, rpm
ϕ = flujo del campo magnético

El voltaje generado es proporcional al corte del flujo magnético, de manera que el motor debe cambiar de velocidad para generar la misma fuerza contraelectromotriz (fcem), si se hace variar la corriente del campo.

Los motores de cc se conectan de varias maneras. Los **motores en paralelo** tienen la armadura y el campo conectados, como lo indica su nombre, en paralelo. Esta conexión proporciona una velocidad casi constante, sea cual fuere el voltaje aplicado. Si el voltaje desciende, la fcem disminuirá también, debido a la reducción de la fuerza de campo. La velocidad puede cambiarse, alterando la corriente del campo o el voltaje de armadura, independientemente. El aumento del voltaje de armadura incrementa la velocidad y el aumento de la corriente de campo la reduce.

Los **motores en serie** tienen la armadura y los devanados de campo conectados en serie, y ambos portan la misma corriente. La velocidad depende tanto del voltaje como de la carga. El esfuerzo de rotación es el producto de la corriente de armadura por el campo magnético, y ambos dependen de la corriente. Para cualquier esfuerzo de rotación de carga específico, la corriente es constante y la velocidad es proporcional al voltaje aplicado. Sin embargo, si la carga cambia, la velocidad varía también. Un 50% de caída en el par de carga reduce la corriente del motor al 70%, lo cual hace que el producto de la corriente de armadura y de campo sea de 50%. La corriente de campo reducida genera una disminución en la fcem y la velocidad del motor aumenta en un 40%. Debido a esta característica, los motores en serie sufren de sobrevelocidades importantes, si no están cargados. Los motores en serie son apropiados para aplicaciones de caballaje constante, con una gama de velocidad amplia, por ejemplo, en máquinas herramientas. También se emplean para transmisiones de tracción (p. ej., carros de compuerta corrediza y locomotoras), algunas grúas, montacargas y elevadores.

Los **motores de cc de devanado compuesto** tienen campos tanto en serie como en paralelo. La adición de un pequeño campo en serie ayuda a proporcionar la cantidad adecuada de regulación o descenso de velocidad sin carga a una carga plena. Los motores en paralelo o de devanado compuesto se aplican bastante a muchas transmisiones de velocidad variable. Son importantes para aplicaciones que requieren una regulación y un ajuste precisos de la velocidad.

La curva inherente de velocidad-esfuerzo de rotación de un motor de cc puede variar enormemente, ajustando las cantidades relativas de los campos en paralelo y en serie. El campo en serie se puede conectar también para ayudar o reforzar el campo en paralelo. La práctica habitual consiste en conectar un campo en serie, de tal modo que contribuya o se sume al campo en paralelo (combinación acumulativa), lo cual da una velocidad de descenso estable, al aumentar la carga.

La gran flexibilidad de los motores de cc tanto debido a sus características de diseño inherentes como por la forma como funcionan, hace que sean muy apropiados para transmisiones de velocidad ajustable, sobre todo en sistemas de transmisión regulada.

UNIDADES MOTRICES DE VELOCIDAD AJUSTABLE

Una de las unidades motrices de velocidades ajustables más antiguas es el **sistema Ward-Leonard** que consta de una combinación de motor-generador de ca a cc y un motor de cc en paralelo o de devanado combinado. La velocidad se ajusta, alterando el voltaje del generador. Un equivalente funcional de esta unidad motriz utiliza un rectificador de voltaje ajustable que alimenta a un motor de cc. Ese sistema cuenta con una sola máquina rotatoria, en contraste con las tres que se tienen en el sistema Ward-Leonard tradicional.

Los rectificadores estáticos controlables modernos, como los tiristores, responden de manera casi instantánea a señales de control y son adaptables como fuente de alimentación de sistemas de impulsión regulada de un tipo más crítico. El sistema sensor y de regulación se diseña para mantener la velocidad, el diferencial de velocidad, la tensión, el esfuerzo de rotación, la corriente, la aceleración y la desaceleración, etc., o cualquier combinación necesaria. Por ejemplo, es factible regular la velocidad de una transmisión con un límite de esfuerzo angular o a través de la aceleración o la desaceleración regulada o limitada.

Las aplicaciones comunes para un voltaje ajustable, las unidades motrices de cc de velocidad ajustable incluyen devanadoras, máquinas y auxiliares para papel, sistemas de mezcla, alimentadoras, extrusoras, calandrias, máquinas herramientas, motores de alineación, cortadoras, grúas, montacargas, palas y líneas de arrastre y una variedad casi ilimitada de transmisiones que reciben la flexibilidad y la eficiencia que son factibles con una corriente continua.

Las **unidades motrices mecánicas de velocidad ajustable** se utilizan cuando no se requiere un alto grado de regulación. Una de ellas consta de un motor de ca de velocidad constante, que impulsa una carga por medio de bandas en V y poleas de paso variable. La gama de velocidad puede ascender hasta 8 a 1, y tienen caballajes de hasta 18.6 kW (25 hp). El ajuste de velocidad es manual o remoto, por medio de una transmisión de motor para ajustar la velocidad. La regulación de velocidad de las condiciones sin carga a carga plena es normalmente de 3 a 6%. La eficiencia es grande a lo largo de toda la gama de velocidades, ya que no hay pérdidas de deslizamiento.

Las **unidades motrices electromagnéticas** son unidades simples de ca de velocidad ajustable, cuya eficiencia es semejante a la de los motores de rotor devanado. Esta unidad motriz utiliza un acoplamiento de deslizamiento magnético impulsado por un motor de jaula de ardilla. El deslizamiento se determina a través de la corriente de excitación y la carga. La eficiencia es proporcional a la velocidad, de donde estos motores son poco económicos para operaciones continuas de baja velocidad y alto esfuerzo de rotación; pero, en cambio, son ideales para ventiladores y bombas centrífugas que requieren pocos ajustes de velocidad, cuando el esfuerzo de rotación decrece rápidamente con la velocidad, así como para controlar la velocidad. Las unidades motrices electromagnéticas son funcionalmente equivalentes a los acoplamientos hidráulicos.

Las **unidades motrices RectiFlow de velocidad ajustable** utilizan tanto el motor de rotor devanado como el de cc conectados al mismo eje. El embobinado del rotor de este tipo de motores se conecta a un rectificador. El rectificador de cc emite una salida que alimenta al motor de cc. Algunos avances recientes logrados en los rectificadores de semiconductor permiten que estas unidades sean prácticas, ofrezcan

gran eficiencia y velocidad ajustable para aplicaciones hasta de varios cientos de caballos de fuerza. Puesto que las pérdidas de rotor del motor de rotor devanado se utilizan para producir la potencia de eje y no se disipan en una resistencia, la eficiencia de esos medios de propulsión es elevada en toda la gama de velocidad. Una unidad motriz RectiFlow- típica de 223.8 kW (300 hp) se opera por encima de un rango y posee una eficiencia de más del 83% en toda su gama de operación. Las unidades motrices de velocidad de 3:1 RectiFlow de velocidad ajustable son apropiadas para transmisiones con un alto esfuerzo de rotación, como las que se emplean en extrusoras, mezcladoras, bombas, ventiladores y hornos.

Una modificación reciente de este sistema básico de impulsión utiliza rectificadores de estado sólido y tiristores, para convertir la potencia de deslizamiento de frecuencia variable del rotor devanado, primeramente en cc y, luego, en energía de frecuencia de línea (60 hertz en Estados Unidos). A su vez, ésta se alimenta nuevamente al sistema de potencia en forma de energía útil.

La **ca de frecuencia ajustable** se utiliza con motores de jaula de ardilla para unidades motrices de velocidad ajustable. Un ejemplo común de aplicación son las pequeñas unidades motrices rotatorias para fibras sintéticas que requieren motores múltiples que operen con velocidad constante. En los casos en que es obligatorio tener una sincronía precisa entre las unidades motrices, se emplean motores sincrónicos de resistencia. Éstos son motores en jaula de ardilla con porciones planas o ranuras en el rotor, que forman polos magnéticos debido al cambio en la trayectoria magnética conforme la posición del rotor se desplaza con respecto al campo del estator. Esto hace que el rotor gire en sincronía exacta con el campo del estator, para cargas ligeras. La fuente de potencia para estas unidades motrices es un generador de ca impulsado por cualquier medio de propulsión de velocidad ajustable, o bien, un inversor estático.

CARCASAS DE MOTORES

Excepto en zonas con peligro de incendio o explosión (zonas de riesgos), las carcasas o cubierta de motores están diseñadas para proporcionar protección a las partes móviles internas. En años recientes, el desarrollo de materiales y acabados aislantes mejorados ha afectado al grado necesario de protección y, en consecuencia, el diseño y la clasificación de las cubiertas.

En el caso de motores de inducción, sincrónicos de alta velocidad e industriales de cc la carcasa estándar es de tipo **abierto y a prueba de goteo**. Este diseño es útil casi para cualquier aplicación bajo techo y muchas en el exterior. La construcción a prueba de goteo proporciona una buena protección mecánica para las partes internas móviles del motor y evita la entrada de líquidos goteantes y partículas de polvo pesadas. No obstante, no lo protege de la humedad, el polvo o los humos corrosivos que arrastra el aire. Las máquinas **protegidas** tienen aberturas que cuentan con algún tipo de protección para evitar que entren al motor objetos de diámetros mayores que 12.7 mm (1/2 in). Los motores a prueba de **salpicaduras** no son afectados por el agua o por partículas sólidas que chocan o penetran bajo la cubierta en un ángulo menor que 100 grados en relación con la vertical.

El siguiente grado de protección para motores grandes es la **protección climatológica tipo I**. Este tipo de motor se define como "una máquina abierta en la cual los pasajes de ventilación están construidos de tal modo que se minimiza la entrada de lluvia, nieve y partículas arrastradas por el aire a las piezas eléctricas" ("motores y generadores", estándar MG-1, NEMA). Todas las aberturas se restringen contra el paso de una varilla de 19-mm-(3/4 in) de diámetro. Algunos sistemas de aislamiento modernos de hoy en día son perfectamente satisfactorios para la mayor parte de las aplicaciones al aire libre.

Los motores **tipo II con protección climatológica** se recomiendan para condiciones en que se desea un mayor grado de protección y una vida más prolongada, para los de mayor tamaño. Su sistema de ventilación cuenta con gran número de placas desviadoras para que el aire pueda girar por lo menos tres codos de 90 grados antes de entrar a las piezas activas del motor [velocidad de aire máxima, 3.05 m/s (600 ft/min)]; por tanto, la lluvia, la nieve y el polvo que arrastran los vientos fuertes pasan por la carcasa del motor sin penetrar a las partes activas.

Los **motores totalmente cerrados** ofrecen la mayor protección posible contra humedad, vapores corrosivos, polvo y tierra. Los motores totalmente cerrados, enfriados por ventilador (TEFC) son la elección obvia, en comparación con el que cuenta con *protección climatológica* de 186.5 kW (250 hp), que se menciona más adelante. El aire interno y externo de ventilación se mantienen separados; el aire externo nunca penetra al interior, excepto por una cantidad mínima que entra por respiración.

Los motores TEFC tienen un ventilador interno para hacer circular el aire externo dentro del motor, y un ventilador externo para expulsar el aire sobre el marco del motor o el intercambiador de calor. Los motores pequeños aproximadamente de 2.238 kW (3 hp) y menos, no requieren abanicos de ventilación y esos motores no ventilados y totalmente cerrados son similares a los TEFC, omitiendo sólo los ventiladores.

Hay aplicaciones en que es obligatorio tener una ventilación forzada separada (p. ej., los motores de velocidad ajustable que funcionan con baja velocidad), que dependen de la ventilación externa. Esta clasificación incluye máquinas *abiertas externamente ventiladas*, máquinas *abiertas con ventilación por tubería* y máquinas *totalmente cerradas con ventilación por tuberías*. En zonas de ambiente corrosivo o de riesgo, se utiliza aire limpio o seguro para ventilar el motor.

Los motores cerrados que tienen enfriadores de aire a agua cuestan mucho menos que los TEFC de más de 373 kW (500 hp); a valores nominales sustanciales, los motores sincrónicos cuestan incluso menos que los protegidos climatológicamente, tipo II. Las máquinas sincrónicas grandes y cerradas, con enfriadores, que se montan en la base del motor, se encuentran con frecuencia a menor costo que los motores con enfriadores integrales montados.

Debido al **riesgo de incendio y explosión**, es necesario utilizar cubiertas especiales para los motores. Los riesgos incluyen gases combustibles y vapores, como la gasolina; polvos, como de carbón, harina o metales que pueden estallar al quedar suspendidos en el aire y fibras, como pelusa de textiles. El tipo de carcasa de motor que se utilice depende de la clase de peligro existente, el tipo y el tamaño del motor y la probabilidad de que se presente una situación de riesgo. Entre las diferentes cubiertas existentes están: motores a prueba de explosión, que pueden soportar un estallido interno; motores ventilados por fuerza, que se enfrían con aire proveniente de un lugar seguro, y motores totalmente cerrados, enfriados mediante intercambiadores de calor de aire a agua, y presurizados con aire, aire para instrumentos o gas inerte.

CONTROL DEL MOTOR

Las funciones básicas de los arrancadores de motor son:

1. Control normal de "arranque-detención" del motor.
2. Protección del motor.
3. Protección del sistema eléctrico de alimentación en el caso de una falla del motor o un corto circuito en el alimentador del motor. La falla debe separarse del resto del sistema para evitar problemas subsecuentes.
4. Aislamiento eléctrico para proporcionar mayor grado de accesibilidad para el mantenimiento.
5. Previsiones para contar con otro control, como, por ejemplo, control maestro de secuencia, dispositivos protectores de paro total (p. ej., temperaturas excesivas en los cojinetes, dispositivos para alta presión de bombeo, control remoto, etc.).

Tipos de arrancadores

De alto voltaje y bajo voltaje La industria eléctrica ha estandarizado la distinción entre alto y bajo voltaje, asignando el nivel de 600

FIG. 24-4 Centro de
voltaje. Nótese la const
que.

FIG. 24-5 Dispos
voltaje con contacto
detención, y fusibles
vadores protectores

antes de entrar a las
ima, 3.05 m/s (600
arrastran los vientos
a las partes activas.
iayor protección po-
r tierra. Los motores
FC) son la elección
cción climatológica
ante. El aire interno
el aire externo nunca
na que entra por res-

para hacer circular el
o para expulsar el aire
ilor. Los motores pe-
os, no requieren aba-
r totalmente cerrados
adores.
una ventilación for-
justable que funcio-
ventilación externa.
ternamente ventila-
ería y máquinas to-
s. En zonas de am-
mpio o seguro para

e aire a agua cuestan
(500 hp); a valores
cuestan incluso me-
II. Las máquinas sin-
se montan en la base
costo que los motores

necesario utilizar cu-
incluyen gases com-
mo de carbón, harina
dos en el aire y fibras,
otor que se utilice de-
el tamaño del motor
ción de riesgo. Entre
es a prueba de explo-
; motores ventilados
de un lugar seguro,
nte intercambiadores
ire para instrumentos

otor son:
del motor.

ación en el caso de una
dor del motor. La falla
oblemas subsecuentes.
mayor grado de acce-

l, como, por ejemplo,
ctores de paro total (p.
ositivos para alta pre-

eléctrica ha estandari-
pando el nivel de 600

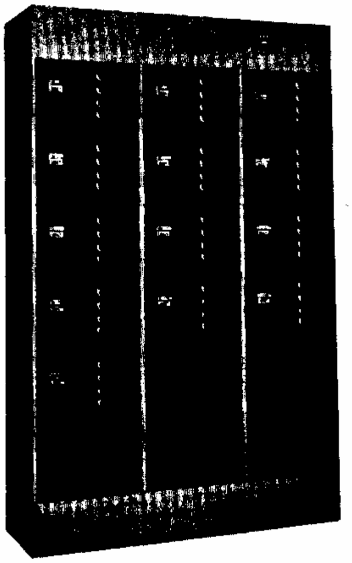


FIG. 24-4 Centro de control motor para un grupo de motores de ca de bajo voltaje. Nótese la construcción modular. Se omitieron los dispositivos de arranque.

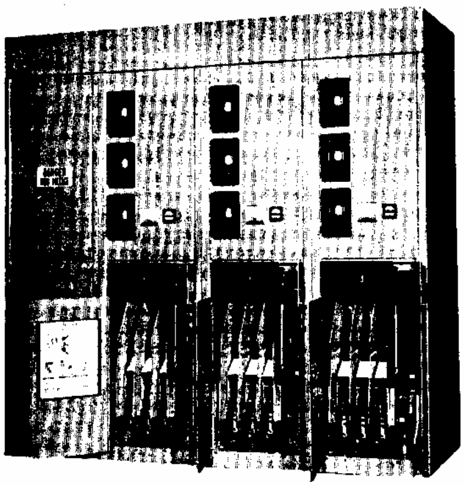


FIG. 24-5 Dispositivos de arranque usuales para motor de inducción de alto voltaje con contactores de freno de aire, para el control normal de arranque y detención, y fusibles para protección contra cortocircuitos. Obsérvese los relevadores protectores en los tableros superiores.

volts. Por debajo de 600 volts, los voltajes de sistemas comunes en Estados Unidos son 120, 208, 240, 480 y 600 volts. Por encima del nivel de 600 volts, los voltajes nominales estándares de sistema de empleo más común son 2400, 4160 y 6900 o 7200. Hay voltajes más altos, pero el costo del motor es, casi siempre, prohibitivo.

En la figura 24-4 se ilustra un grupo de arrancadores de bajo voltaje en una configuración de centro de control motor. Los mismos arrancadores se utilizan para cualquier voltaje inferior a 600. El aislamiento es el mismo para todos los voltajes, ya que para este equipo sólo se tiene una clase de aislamiento.

Para aplicaciones de arrancadores de motor de alto voltaje, hay varias clases de aislamiento: 2500, 5000, 7500 y 15 000 volts. El arranque normal de motor de alto voltaje y tipo de control se produce para servicios de 2500 a 5000 volts. Para voltajes superiores a estos valores, es preciso utilizar mecanismos de conmutación.

En la figura 24-5 se muestran arrancadores de tipo de control de alto voltaje. La construcción utilizada aquí emplea márgenes más amplios y proporciona características de seguridad adicionales, como barreras conectadas a tierra entre las secciones de alto y bajo voltaje. También se acostumbra emplear interconexiones mecánicas y eléctricas de extensión para lograr una seguridad adicional.

Una de las principales diferencias entre los arrancadores de alto y bajo voltaje es la cantidad de potencia que pueden manejar. La línea divisoria aproximada se fija en 149.2 kW (200 hp), sin embargo, no se trata de una regla rígida y fija.

Arrancadores en línea y en combinación El arrancador en línea consta de un contactor (interruptor de arranque del motor) y relevadores para la sobrecarga del motor. Los contactores son capaces de portar o interrumpir las corrientes normales de arranque de motor y funcionamiento; sin embargo, no son en general capaces de interrumpir corrientes de corto circuito. Para esta función, es preciso reforzarlos con fusibles o algún interruptor de circuito.

Cuando se incluye bajo la misma cubierta del contactor un interruptor de desconexión de circuito, o un juego de fusibles, el arrancador se denomina **arranque de combinación**. Además de la función de interrupción por falla de corriente, los fusibles o el interruptor actúan como dispositivo de desconexión. En la figura 24-6 se ilustra un diagrama esquemático de una combinación de arrancadores de varios tipos. Los arrancadores que se muestran en las figuras 24-4 y 24-5 son combinados. El seguro se monta de tal manera que abra la desconexión antes que se pueda abrir la puerta. Se toman también medidas para tener un candado en la abertura de desconexión con la puerta cerrada, con el fin de que el trabajo de mantenimiento del motor pueda realizarse con seguridad.

Arrancadores manuales y magnéticos Los arrancadores manuales para motor funcionan, como indica su nombre, activándolos con la mano. El tipo más simple de arranque manual es un interruptor de resorte sin protección para sobrecargas, que se utiliza sólo para motores

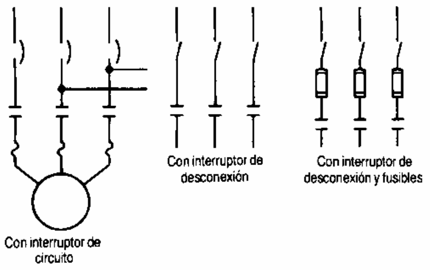


FIG. 24-6 Diagrama esquemático simplificado de una combinación en línea de arranque con interruptor de circuito, como elemento de interrupción y desconexión. Los fusibles y el interruptor de desconexión alternos se muestran como sustitutos del interruptor de circuito.

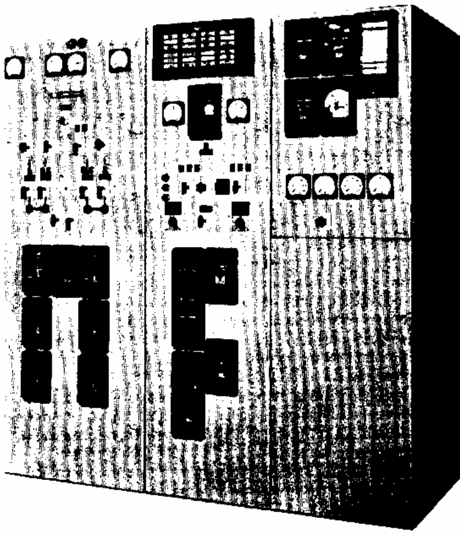


FIG. 24-7 Montaje usual de conmutación en línea, en estantería metálica, que incluye arrancadores de motor y relevadores de protección.

de 1.492 kW (2 hp) o más pequeños, que son habitualmente de una sola fase con protección integral para sobrecargas.

Los arrancadores magnéticos de motor tienen un funcionamiento similar a los manuales, excepto que funcionan con un solenoide. Se fabrican para niveles del orden de 3730 kW (5000 hp). Una de las principales ventajas es la conveniencia de su funcionamiento eléctrico. Los botones de presión de "arranque-detención" se pueden ubicar en cualquier punto. Cuando se requiere un funcionamiento automático o remoto, es obligatorio usar arrancadores magnéticos.

Comparación del control con mecanismo de conmutación y de tipo contactor Con frecuencia se emplean mecanismos de conmutación para controlar el motor, sobre todo cuando se trata de unidades grandes de alto voltaje. Los mecanismos de conmutación (Fig. 24-7) deben utilizarse en motores con valores nominales mayores que 3357 kW (4500 hp)* a 4160 o 4600 volts o 1865 kW (2500 hp)* a 2300 volts, y para todos los motores con un valor superior a 5000 volts. El mecanismo de conmutación consiste de interruptores de circuito y relevación protectora. Los interruptores de circuito son conmutadores eléctricos diseñados primordialmente por su capacidad para interrumpir corrientes de corto circuito. Normalmente los contactores dependen de un conjunto de fusibles o interruptores de circuitos para manejar fallas sustanciales (cortos circuitos).

Los contactores se diseñan para tener un funcionamiento frecuente. Los interruptores de circuito se diseñan para operaciones menos frecuentes y, por tanto, nunca se utilizan como arrancadores de motor cuando se requiere una operación repetitiva. Un ejemplo usual de operación frecuente es el servicio de montacargas en una mina, en donde el motor se debe invertir al concluir cada acción de elevación o de descenso; en este caso se deben utilizar contactores.

Los arrancadores de motor de tipo de control para ca de alto voltaje utilizan fusibles para proporcionar la capacidad de interrupción en corto circuito. Una desventaja de los fusibles es que sólo uno de ellos puede destruirse, lo cual deja una sola fase aplicada al motor. Los motores seguirán funcionando con energía de una sola fase, pero se pueden sobrecalentar incluso pasando menos corriente que la nominal. En contraste con los contactores, los interruptores de circuito son dispositivos de tres polos; en caso de que se sufra una falla en una de las fases, se interrumpirán los tres, reduciendo al mínimo el problema de una sola fase.

* 3730 kW (5000 hp) y 2051 kW (2750 hp) para motores sincrónicos con factor de potencia igual a la unidad.

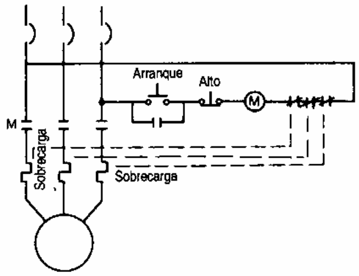


FIG. 24-8 Diagrama esquemático de una combinación de arranque, en donde se muestra un patrón de control simple.

Control centralizado Como se mencionó antes, los arrancadores de motor se pueden ubicar ya sea en el motor o en algún punto remoto. Con frecuencia, los arrancadores de motor se agrupan en una ubicación conveniente para la fuente de alimentación. Estas fuentes se comunican desde este punto hasta las cargas de motor individuales. Un método conveniente es la estructura modular de centro de control (Fig. 24-4) para ejercer una regulación de voltaje, en que se montan los arrancadores de motor y otros dispositivos de control. Los arrancadores individuales pueden extraerse de la estructura para darles un mantenimiento rápido y fácil, así como para realizar los ajustes necesarios. Con esta construcción es fácil cambiar el tamaño del arrancador o conectar arranques adicionales. Todos los arrancadores se concentran en una sola ubicación, de manera que la interconexión es sencilla y su verificación se facilita enormemente. También se pueden incluir relevadores auxiliares, transformadores de control y otros dispositivos de control especiales. Véase la Fig. 24-8.

Protección del motor El dinero que se gasta en dispositivos de protección para el motor se puede comparar con un seguro en el cual las primas dependen del valor protegido cuando el valor protegido es el costo del motor, el de las reparaciones previstas o el costo del tiempo de suspensión de labores, la producción perdida y, en algunos casos, daños contingentes a otros equipos.

Protección contra sobrecargas Los relevadores de sobrecarga para proteger el aislamiento del motor en contra de temperaturas excesivas se localizan ya sea en el control o el motor propiamente dicho. El método más común consiste en emplear relevadores térmicos contra sobrecorrientes en el arranque. Estos relevadores tienen características de calentamiento similares a las del motor que se desea proteger. La corriente de motor o una corriente en línea con éste, proporcional, pasa por los relevadores, de tal manera que su calentamiento es semejante al del motor.

Los relevadores térmicos contra sobrecorrientes de tipo estándar ubicados en el arranque tienen ciertas desventajas: no pueden detectar temperaturas anormales en el motor, producidas por el bloqueo de los pasajes de ventilación o debidas a temperatura ambiente elevadas en el mismo. También tienden a actuar como restricciones innecesarias en sitios en donde la cubierta del control se encuentra a una temperatura superior a la del motor. Normalmente los motores se ventilan con aire externo, para que su temperatura ambiente sea la misma que la del aire que lo rodea. No obstante, las cubiertas de control no tienen el mismo grado de ventilación, de modo que la temperatura interna puede ascender en ocasiones a niveles elevados, si se encuentra en un sitio

asoleado. Los relevad
ces, para evitar esta si
cesariamente, debido
cubierta de control; p
durante la época de fi
situaciones, se deberí
peratura ambiente.
Hay algunos sisten
en forma directa la te
varios métodos posib
Los motores peque
tección contra sobrec
tato en el motor que d
del mismo. Cuando e
se abre, interrumpien
tos piloto que se mon
se limitan a detener
corriente de línea. Es
para sobrecargas sos
devanado de cobre y
para condiciones de
Los detectores de
dan una indicación
tanto detectores de r
cional como termon
sumamente sensible
estos dispositivos ini
tan una alarma o det
Protección contr
eliminar con rapidez
presente y evitar pe
protección contra cc
posible, para que la
corriente de entrada
el nivel al cual se pue
En el caso de los mo
corto circuito se deb
corriente de funcion
do sobre la entrada
corriente a carga pl
bajo voltaje se fabri
se pueden ajustar y f
del motor.
Los controles de
los fusibles de pote
fusibles se coordina
el circuito del moto
desde las condicion
corriente máxima.
Protección cont
condición en que el
nicos y de jaula de a
tiene más probabili
El calentamiento d
estator durante el ar
gran tamaño, una d
positivos o las car
funcionamiento y c
de sobrecarga y pro
nados para resolve
cas del motor.
La frecuencia de
que se cuenta con
temas de control e
como la corriente i
Protección con
suspensión de serv
de la línea de alim

asoleado. Los relevadores para corrientes elevadas se emplean, a veces, para evitar esta situación. Esto evita que el motor se detenga innecesariamente, debido a un ambiente demasiado caliente dentro de la cubierta de control; pero el motor no estará indebidamente protegido durante la época de frío y en días nublados o en la noche. Ante estas situaciones, se deberá utilizar relevadores de compensación para temperatura ambiente.

Hay algunos sistemas de protección contra sobrecargas que miden en forma directa la temperatura del devanado del motor, y se tienen varios métodos posibles.

Los motores pequeños de una sola fase se construyen con una protección contra sobrecargas ya instalada. Se incluye a veces un termostato en el motor que detecta directamente la temperatura del devanado del mismo. Cuando el motor sufre sobrecalentamientos, el termostato se abre, interrumpiendo la corriente de línea del motor. Los termostatos piloto que se montan en los devanados en motores de mayor tamaño se limitan a detener el arranque del motor, en lugar de interrumpir la corriente de línea. Este método proporciona una protección aceptable para sobrecargas sostenida; pero, debido a la demora técnica entre el devanado de cobre y el termostato, no ofrece la protección conveniente para condiciones de estancamiento o para sobrecargas severas.

Los detectores de temperatura insertados en el devanado de motor dan una indicación exacta de la temperatura del mismo. Se utilizan tanto detectores de resistencia para temperaturas (RTD) de tipo tradicional como termorresistencias especiales (resistencias no lineales, sumamente sensibles a la temperatura). Con los auxiliares apropiados, estos dispositivos indican o registran la temperatura del motor, conectan una alarma o detienen el funcionamiento del motor.

Protección contra corto circuitos Los corto circuitos se pueden eliminar con rapidez, a fin de evitar daños graves ante la falla que se presente y evitar perturbaciones en el resto del sistema eléctrico. La protección contra corto circuitos se debe establecer al nivel más bajo posible, para que la acción de suspensión se inicie con toda rapidez. La corriente de entrada para el arranque del motor fija un límite que indica el nivel al cual se pueden establecer los dispositivos para corto circuito. En el caso de los motores en jaula de ardilla, el disparo instantáneo de corto circuito se debe iniciar, aproximadamente, entre 7 y 10 veces la corriente de funcionamiento a carga plena. Esto da un margen adecuado sobre la entrada normal, que es, aproximadamente, seis veces la corriente a carga plena. Los arrancadores combinados modernos de bajo voltaje se fabrican con interruptores de circuito instantáneos que se pueden ajustar y fijar un poco por encima de la corriente de arranque del motor.

Los controles de motor de tipo contactor y alto voltaje dependen de los fusibles de potencia para protegerlo contra los corto circuitos. Los fusibles se coordinan con los relevadores de sobrecarga para proteger el circuito del motor a todo lo largo de la gama de condiciones de falla, desde las condiciones de sobrecarga hasta verdaderos cortocircuitos a corriente máxima.

Protección contra rotores bloqueados Cuando se presenta una condición en que el rotor se bloquea, los rotores de los motores sincrónicos y de jaula de ardilla de gran tamaño son el elemento de motor que tiene más probabilidades de dañarse debido a un sobrecalentamiento. El calentamiento del rotor no se relaciona con el calentamiento del estator durante el arranque. Por consiguiente, en el caso de motores de gran tamaño, una de las prácticas comunes consiste en separar los dispositivos o las características para protegerlo contra sobrecargas de funcionamiento y condiciones de rotor bloqueado, si los dispositivos de sobrecarga y protección contra corto circuito no pueden ser coordinados para resolver esta condición, dadas las características específicas del motor.

La frecuencia del rotor de un motor sincrónico se detecta gracias a que se cuenta con el circuito de campo del rotor. Se han diseñado sistemas de control especiales que toman en cuenta tanto la velocidad como la corriente inducida del rotor para proteger.

Protección contra descensos del voltaje Cuando se registra una suspensión de servicio eléctrico, es necesario desconectar los motores de la línea de alimentación para evitar las sobrecorrientes de arranque que se tienen en el sistema eléctrico cuando el voltaje se restablece. También debe considerarse que es poco seguro poner en funcionamiento todos los motores en forma indiscriminada una vez que se vuelve a establecer el servicio eléctrico. Por el contrario, quizá sea conveniente dejar los motores conectados durante breves descensos de voltaje, lo que constituye una protección para descensos, tomando en cuenta la demora. La protección contra descensos instantáneos de voltaje desconecta el motor tan pronto como dicha reducción es apreciable. Este tipo de protección es satisfactorio cuando la continuidad del funcionamiento es relativamente poco importante. Esto es inherente en los arranques magnéticos de bajo voltaje, en que una pérdida de potencia dispara la desconexión de todos los contactores tan pronto como se registra un descenso de voltaje. Si se desea establecer una protección con demora para descensos de voltaje para estos controles, se deben agregar al circuito de control estándar relevadores de demora de tiempo. Puesto que los interruptores de circuito no se desconectan con los descensos de voltaje, es necesario incluir relevadores contra descensos de voltaje.

Protección contra fases invertidas En algunos motores de gran tamaño se emplean relevadores de fase invertida, para evitar que arranquen cuando la rotación de fase del sistema eléctrico se invierte, debido a un cableado incorrecto o al mantenimiento indebido. También se emplean como relevadores para descensos de voltaje y equilibrio de voltaje. Se pueden aplicar relevadores individuales a cada motor, en lugar de tener un relevador de subvoltaje, o bien, se puede instalar uno de ellos en un conductor para varios motores. Los relevadores individuales son más costosos, pero también más seguros, sobre todo cuando los circuitos de motor cambian con frecuencia. Este tipo de protección se aplica normalmente en arranques de tipo de conmutación y alto voltaje.

Protección para equilibrio de corriente de fase Los motores trifásicos de ca siguen funcionando, casi siempre, en una sola fase. La fase individual se convierte en un problema en motores grandes de ca debido a que generan un calentamiento excesivo del rotor. Las condiciones de una sola fase no se pueden detectar midiendo el voltaje; un motor en funcionamiento actúa como generador, de manera que, incluso en condiciones de una sola fase, el voltaje de terminal del mismo es casi normal. Los relevadores de equilibrio de corriente dan una indicación positiva del desequilibrio de la corriente del sistema y el funcionamiento en una sola fase. Normalmente, se emplea un relevador trifásico para cada motor. El empleo de estos relevadores se restringe a motores grandes [(aproximadamente, de 1119 kW (1500 hp) y mayores], en donde el valor del equipo protegido justifica el costo de tal protección.

En arrancadores de motor de ca y bajo voltaje, se establece una protección adecuada para la fase sola, utilizando tres relevadores contra sobrecarga, que en la actualidad se han convertido en equipo estándar. El calentamiento del rotor no constituye un problema importante en motores de menor tamaño, que tienen más capacidad térmica; pero es importante proteger los devanados del estator de dichas máquinas, para evitar que se quemen.

Protección diferencial La protección diferencial se aplica para detectar rápidamente fallas internas del motor y minimizar los daños posibles. El costo de esta protección se justifica en motores grandes [de 1119 kW (1500 hp) y más], en los cuales la restricción del daño al motor representa un ahorro muy superior al costo de esta protección adicional.

La protección diferencial de un motor es la más sensible de las formas de protección existentes para motores grandes. En la figura 24-9 se ilustran los principios básicos en que se basa. Los seis cables (los dos extremos de los tres devanados) se conectan a las terminales. La corriente eléctrica que entra a cada devanado y la que sale del mismo pasa por el mismo transformador de corriente, en direcciones opuestas. Si todo está normal, dichas corrientes son iguales y no se induce ninguna corriente en el devanado del transformador de corriente. Si ocurre un corto circuito de fase a fase (devanado a devanado) o de devanado a tierra, las corrientes no se equilibran, se induce una corriente en el devanado del transformador de corriente, y el relevador

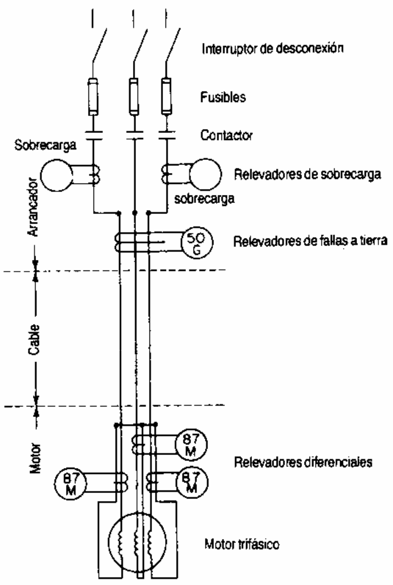


FIG. 24-9 Arrancador usual de motor de ca de alto voltaje; se ilustran varias formas de protección: fusibles, relevadores de sobrecarga, relevadores para fallas a tierra y relevadores diferenciales con los transformadores de corriente correspondientes que actúan como sensores de fallas de corriente. En la práctica, los transformadores diferenciales para la protección contra corrientes se localizan en el motor, pero los relevadores forman parte del arrancador.

diferencial se dispara instantáneamente, apagando el motor. Debido a la sensibilidad y la velocidad con que opera, este sistema limita el daño al motor, minimizando los costos de reparación y el tiempo de paralización del trabajo.

Protección para fallas de tierra Los motores de alto voltaje (2300 volts y más) se deben proteger con relevadores para fallas de tierra, si la fuente de energía está conectada a tierra (véase la Fig. 24-9). Este método incluye un transformador de corriente de diámetro grande (ct), que encierra los tres cables del motor. La corriente en cortocircuito conectada a tierra fluye a través del ct hasta ella, y regresa a la fuente de alimentación externa al ct; este desequilibrio induce una corriente en el ct y el relevador a tierra, lo cual detiene al motor. Con esta protección sólo se necesitan dos relevadores para sobrecargas y dos ct de línea (en lugar de los tres normales), de manera que la protección adicional será muy económica. No obstante, no se puede utilizar a menos que la fuente de alimentación esté conectada a tierra.

Tanto el relevador diferencial como el de tierra son capaces de detectar fallas de tierra. La protección de tierra para fallas de tierra se localiza en el arranque y protege el cable y al motor; los ct diferenciales se localizan en el motor y sólo protegen a éste. Las prioridades económicas estipulan que se debe instalar primero una protección contra fallas de tierra, agregando después protecciones diferenciales, cuando el ahorro potencial en tiempo improductivo y los costos de reparación lo justifiquen.

Protección contra sobretensiones Los motores de alto voltaje se deben equipar con aparatos de protección contra sobretensiones, consistentes en un conjunto de tres pararrayos y tres capacitores de sobrecarga. Los voltajes excesivos, potencialmente dañinos, se pueden generar en un sistema eléctrico al ejecutar operaciones de conmutación, cuando se producen ciertas fallas o en caso de relámpagos. Los capacitores de sobretensión reducen estas descargas de voltaje excesivas y los pararrayos limitan el voltaje de pico; estas dos funciones son esenciales para asegurar una protección adecuada. La protección contra cargas excesivas se debe ubicar en las terminales de cada motor para lograr una protección máxima, aunque en muchos casos se tiene un solo equipo contra sobrecargas, que se conecta al conductor eléctrico que alimenta varios motores.

Control especial

Arranque con voltaje reducido El arranque con voltaje reducido se utiliza para limitar el descenso de voltaje en el sistema. Los descensos de voltaje se deben restringir porque, de lo contrario, pueden desconectar otros motores de la línea, provocar que los motores sincrónicos del sistema queden fuera de paso o causen una oscilación molesta en las lámparas.

Los métodos de arranque con voltaje reducido más simples son el arranque con resistencia y con reactor. Estos sistemas requieren dos contactores o interruptores de circuito y un conjunto de reactores o resistencias, en contraste con el arranque de un solo contactor con voltaje pleno. El contactor de arranque se cierra primero, conectando la energía a las terminales del motor por medio de los reactores. La impedancia del circuito reduce el voltaje de terminal del motor y la corriente de arranque. Conforme se acerca a la velocidad plena, el contactor de funcionamiento se cierra, desconectando los reactores, y aplicando el voltaje de línea a las terminales del motor. La corriente de arranque se reduce en proporción a la disminución en el voltaje del motor. Sin embargo, el par o momento de torsión es proporcional al cuadrado del voltaje del motor, de manera que el esfuerzo de rotación se reduce todavía más que la corriente de arranque.

TABLA 24-3 Efectos de arranque a voltaje reducido *

Tipo de arrancador	Voltaje de motor	Corriente del motor	Corriente de línea o de la fuente	Par motor	Baja del voltaje en la fuente
Diseño	100	100	100	100	0
Voltaje completo real	80	80	80	64	20
Reactor:					
Toma de 0.8	67	67	67	45	17
Toma de 0.65 . . .	56	56	56	31	14
Toma de 0.5	44	44	44	20	11
Autotransformador:					
Toma de 0.8	69	69	55	48	14
Toma de 0.65 . . .	59	59	38	35	10
Toma de 0.5	47	47	24	22	6

Si se necesita una mayor reducción en la corriente de línea para poner en funcionamiento los motores de ca que es posible con el arranque con reactor, se pueden utilizar autotransformadores. Debido a la acción de transformador, la reducción en el par de rotación-arranque del motor es directamente proporcional a la reducción en la corriente de línea. En la tabla 24-3 se compara el arranque con reactor y autotransformador, con respecto a la corriente de línea y el esfuerzo de rotación. Otros métodos de arranque con voltaje reducido se emplean con menos frecuencia e incluyen el arranque a devanado parcial y los arranques de estrella-triángulo.

Arrancadores de motor sincrónico Excepto por la adición del tablero de aplicación de campo de un motor sincrónico, los patrones de control son idénticos tanto para este tipo de motor como para los de inducción. La excitación no se aplica a los motores sincrónicos hasta

que llegan, más o men
po se debe aplicar cu
espacio apropiada co
la velocidad como la
generado en el deva
proporcional al desli
magnitud y la polarid
tiva al campo de la a
sición apropiadas se
arranque a voltaje red
antes de aplicar la co

Arranques de ca
ducción de velocidad
solo devanado con c
amplitud de polo mo
te alterna de velocid
dos devanados y do
arranques estándares
en el mismo recipien
adecuadas, de mane
forma simultánea.

Los motores de d
consecuente o de ar
de tres y cinco polos
motores de dos dev
combinación de arr
dos devanados y d
cuente es factible, o
cidades múltiples.

Control secunda
de rotor devanado s
reducido sin ningún
do una resistencia s
circuito secundario
de arranque y afect

Cuando se utiliz
las características d
corta duración nor
resistencia se corta
características dese

MÁQUINAS D

El advenimiento d
medios de transm
ción inferior com
la ventaja de ser s
se obtienen con ot
la desventaja de s
expulsa.

En el **motor sim**
reciprocantes de a
carrera y no se exp
cia relativamente
se regula mediant
ción adecuada del
puede suministrar
den emplear para
tuberías o para ot
te un lapso corto.

Las **máquinas**
válvulas de inter

que llegan, más o menos, al 95% de la velocidad. La corriente de campo se debe aplicar cuando los polos del mismo tienen una relación de espacio apropiada con el campo magnético rotatorio del estator. Tanto la velocidad como la posición se establecen gracias al voltaje en ca generado en el devanado del campo. La frecuencia es directamente proporcional al deslizamiento y, por lo tanto, estipula la velocidad; la magnitud y la polaridad de la onda generada señalan la posición relativa al campo de la armadura. Cuando se detecta la velocidad y la posición apropiadas se aplica la corriente de campo. Cuando se utiliza un arranque a voltaje reducido, la secuencia de arranque de ca se completa antes de aplicar la corriente de campo.

Arranques de ca con velocidades múltiples Los motores de inducción de velocidades múltiples son motores de dos devanados, de un solo devanado con conexión de polo consecuente o bien, motores de amplitud de polo modulada (véase la subsección "Motores de corriente alterna de velocidades múltiples"). Los arrancadores de motores de dos devanados y dos velocidades son muy sencillos; constan de dos arranques estándares de un solo polo y una sola velocidad, encerrados en el mismo recipiente con las interconexiones eléctricas y mecánicas adecuadas, de manera que los dos contactores no se puedan cerrar en forma simultánea.

Los motores de dos devanados y dos velocidades, ya sea de polo consecuente o de amplitud de polo modulada, requieren un contactor de tres y cinco polos, interconectado mecánica y eléctricamente. Los motores de dos devanados de tres y cuatro velocidades necesitan una combinación de arrancadores de un devanado y dos velocidades o de dos devanados y dos velocidades. Cualquier modificación subsecuente es factible, convirtiéndolos en un control de inversión de velocidades múltiples.

Control secundario de motores de rotor devanado Los motores de rotor devanado se pueden poner en funcionamiento con un voltaje reducido sin ningún problema, o bien, controlar su velocidad, utilizando una resistencia secundaria externa. La adición de la resistencia al circuito secundario de un motor de rotor devanado reduce la corriente de arranque y afecta la velocidad en condiciones de carga.

Cuando se utiliza una resistencia secundaria externa para mejorar las características de arranque, se acostumbra utilizar resistencias de corta duración nominal. Conforme se acelera el motor, los pasos de resistencia se cortan según una base de tiempo o corriente, para dar las características deseadas de par de aceleración y corriente.

Cuando se utiliza una resistencia secundaria externa para ajustar la velocidad, las resistencias pueden ser infinitamente ajustables (p. ej., reóstatos líquidos) o ajustables por etapas (en los casos en que no se requiere un ajuste fino de la velocidad).

Control de un motor de cc El control para motores de cc varía desde los simples arrancadores de línea manuales hasta los sistemas de regulación muy complejos. Aquí sólo se tomarán en consideración los problemas de arranque, ya que las transmisiones de velocidad variables y los sistemas de regulación se estudian en otras partes de esta obra.

Las principales diferencias entre los arrancadores de ca y cc son necesarias debido a la limitación de la conmutación de los motores de cc que es la capacidad de los segmentos individuales del conmutador para interrumpir su porción de corriente de armadura, conforme cada segmento se aleja de las escobillas. Por lo común, se puede conmutar con seguridad del 250 a 275% de la corriente nominal. Puesto que la corriente de arranque del motor está limitada sólo por la resistencia de la armadura, el arranque en línea se utiliza sólo para motores de cc muy pequeños [de 1492 W (2 hp) aproximadamente]. En cualquier otro caso, el conmutador se flameará y destruirá el motor. La resistencia externa para limitar la corriente se debe utilizar durante el arranque para evitar esta posibilidad.

Los reóstatos manuales se utilizan en serie con la armadura del motor para desempeñar funciones de limitación de corriente. Si el reóstato tiene una capacidad térmica amplia, también puede servir para hacer variar la velocidad. Cuando se emplea este sistema se deben incluir interconexiones para evitar el cierre del contactor, a menos que se tenga una resistencia máxima en el circuito.

Los arrancadores magnéticos desconectan la resistencia de arranque en una o varias etapas, basándose en el tiempo, la corriente o la velocidad. El número de etapas o pasos depende del tamaño del motor y la aplicación. Con frecuencia se utiliza una aceleración de corriente límite para transmisiones de gran inercia que requieren un tiempo de aceleración prolongado. La corriente del motor se detecta mediante un relevador de corriente que activa los contactores de desconexión en secuencia, conforme desciende la corriente. Sin embargo, la aceleración a tiempo límite es más común. El motor se acelera en un tiempo definido, desconectando las etapas de resistencia de arranque con una secuencia cronometrada.

MÁQUINAS RECIPROCANTES O DE MOVIMIENTO ALTERNATIVO

MÁQUINAS DE VAPOR

El advenimiento de los motores eléctricos, las turbinas de vapor y otros medios de transmisión han relegado el motor de vapor a una posición inferior como medio de impulsión industrial. No obstante, tiene la ventaja de ser seguro y poseer características de operación que no se obtienen con otros medios de propulsión, pero también cuenta con la desventaja de su gran volumen y el vapor de salida aceitoso que expulsa.

En el **motor simple sin expansión**, como el que se utiliza en bombas reciprocantes de acción directa, el vapor se admite a lo largo de toda la carrera y no se expande dentro del cilindro, lo cual genera una eficiencia relativamente baja. El control es sencillo y la velocidad de la bomba se regula mediante el estrangulamiento del vapor. Si se hace una selección adecuada del vapor y el tamaño de los pistones de la bomba, ésta puede suministrar altas presiones de cierre o interrupción, que se pueden emplear para contrarrestar bloqueos temporales en las líneas de las tuberías o para otras situaciones que requieren una gran presión durante un lapso corto.

Las **máquinas de expansión de vapor** de mayor eficiencia utilizan válvulas de interrupción o corte para limitar la admisión de vapor al cilindro durante la parte inicial de la carrera y la expansión ocurre durante el resto de la misma. Los motores de mayor tamaño utilizan varios cilindros en serie para lograr la expansión total. Aunque esta clase de motor se puede controlar con válvulas de estrangulamiento, el método preferido consiste en cambiar el punto de corte, eliminando con ellos las pérdidas de la válvula de estrangulamiento y permitiendo cambiar la salida de cero a la potencia máxima de diseño. Por lo tanto, se logra la expansión casi completa con cargas parciales y sobrecargas, lo cual genera un funcionamiento eficiente para la gama completa de las cargas.

Aunque este tipo de motor es eficiente, está limitado por su incapacidad para utilizar la expulsión a bajo vacío o las presiones altas de vapor, y las temperaturas que se emplean comúnmente en las turbinas de vapor. Con presiones de vapor reducidas [2068 kN/m² (300 lb/in² manométrica)] y vacíos limitados [88 kN/m² (26 in de Hg)], la máquina de vapor ofrecerá mayor eficiencia que la turbina de vapor para la misma potencia nominal. Para cada ajuste de interrupción, el motor desarrollará el mismo par de rotación con todas las velocidades, mientras que el consumo de vapor y la salida de potencia serán directamente proporcionales a la velocidad. Todas las otras transmisiones, excepto ciertos motores eléctricos de cc requieren la misma entrada para un par constante con velocidades variables.

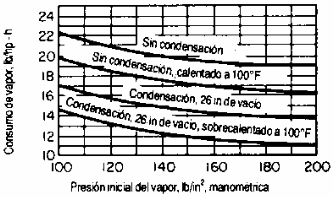


FIG. 24-10 Consumo de vapor de un motor uniflujo de 480 hp. Para convertir libras por caballos de fuerza-hora en kilogramos por kilowatt /hora, multiplíquese por 0.6084; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.89×10^{-3}.

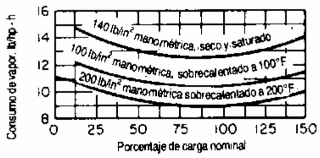


FIG. 24-11 Consumo de vapor de un motor de uniflujo con un vacío de 27.5 in. Para convertir libras por caballos de fuerza-hora en kilogramos por kilowatt/hora, multiplíquese por 0.6084; para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.89×10^{-3}.

El cambio de ajuste del punto de interrupción permite que un motor diseñado para un gas opere eficientemente con cualquier otro (con la única limitación de la corrosividad, la deposición de suciedad, etc.). Esta característica favorece el empleo de motores reciprocantes cuando es necesario dilatar gases con eficiencia en aplicaciones de proceso en que la composición es variable. Una ventaja adicional es que un motor es el único impulsor con un consumo de gas esencialmente de cero con velocidad cero, mientras que desarrolla el par de rotación pleno y mantiene presiones de proceso completas. La combinación de un motor de expansión que impulsa a un freno de aceite, proporciona un efecto de refrigeración de alta eficiencia en una gama amplia de condiciones de proceso, cuando los controladores de proceso regulan el flujo de aceite dentro del freno de aceite.

El **diseño de uniflujo** reduce la condensación del cilindro y permite también razones de expansión superiores por cilindro (véanse las Figs. 24-10 y 24-11). El vapor se admite durante la iniciación de la carrera de potencia, y después de la interrupción se expande hasta una presión ligeramente mayor que la de expulsión. Al concluir la carrera, el pistón descubre los conductos de salida del cilindro con vapor parcial y lo descarga al sistema de expulsión. El resto del vapor que está dentro del cilindro se comprime durante la carrera de retorno del pistón, manteniendo temperaturas promedio superiores en el cilindro, con el fin de reducir la condensación de vapor durante la admisión.

Para limitar la fricción y el desgaste del cilindro, se inyecta aceite a los cilindros de los motores, y para mantener la lubricación, se deben calentar los cilindros de los motores que funcionan a baja temperatura. Los aceites generan espumas en las calderas y pueden contaminar las corrientes de proceso de baja temperatura de donde, en plantas de vapor, el aceite se separa casi siempre del condensado. Es factible omitir el aceite para lubricación si se utilizan anillos de carbono o plástico similares a los que se emplean en los compresores de vaivén sin aceite. Sin embargo, estos anillos no son seguros ni tienen una duración de vida tan buena como los anillos de pistón de hierro colado lubricados.

MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El tamaño de los motores de combustión interna varía desde los pequeños portátiles de gasolina, hasta las grandes unidades diesel [14 914 kW (20 000 hp)], que se utilizan para la propulsión de buques. Generalmente se diseñan para aplicaciones industriales específicas y para satisfacer objetivos particulares, como peso por caballaje, seguridad y condiciones de operación.

Todos los motores de combustión interna se clasifican en dos tipos principales: de cuatro y dos ciclos. Esos motores se subdividen en **1)** motores de gasolina o gas (ciclo Otto), en los cuales se utiliza una bujía para encender una mezcla precombinada de combustible y aire; **2)** motores diesel (ciclo diesel), en los cuales la compresión a alta presión eleva la temperatura del aire hasta la temperatura de ignición del aceite combustible inyectado; **3)** motores de combustible doble o de gas y aceite en los que el combustible es una combinación de gas y aceite en cualquier razón deseada, a condición de que se utilice en todo tiempo por lo menos el 5% del aceite, y **4)** motores de tres combustibles, que pueden funcionar como unidades de dos combustibles y un gas directo, reemplazando el sistema de inyección de aceite con una bujía para la ignición.

Características de diseño Los motores de combustión interna implican considerar las siguientes características de diseño: **1) Relación de compresión**, cuyo incremento hace aumentar por lo común la eficiencia del motor; pero produce también temperaturas de ciclo promedio más altas y, por lo tanto, los cilindros, las cabezas de los pistones y los anillos se calientan con mayor intensidad, lo cual incrementa los problemas de la lubricación de los pistones. **2) Velocidad de pistón**, que es un criterio general importante para el diseño del motor, ya que la clasificación nominal de la potencia es proporcional a la velocidad del pistón. Las fuerzas oscilantes y los problemas de lubricación aumentan con la velocidad del pistón. **3) Presión media eficaz de frenado** (bmep) correspondiente a las siglas inglesas (bmep), que es una medida general de la salida de un marco de motor; la bmep aumenta con la razón de compresión y el grado de sobrecarga y, en general, los valores elevados se asocian con los motores industriales modernos de alta eficiencia. También constituye el criterio general para las cargas de los cojinetes y la carga promedio del pistón, así como para la temperatura del cilindro. **4) Potencia nominal del motor**, que es proporcional al producto de la velocidad del pistón y la bmep. Los valores aceptables de la velocidad del pistón y la bmep dependen más del empleo industrial que del tipo de motor. **5) Sobrecarga**, que representa los medios para incrementar la presión de aire del múltiple de entrada por encima de la presión ambiente. **6) Turbocarga**, que se aplica a la expansión de los gases calientes de expulsión a través de una turbina para impulsar el compresor de sobrecarga. Puesto que la salida de potencia es proporcional a la presión de aire del múltiple de entrada, la sobrecarga proporciona una salida de potencia incrementada y casi siempre una mayor eficiencia. Los motores muy sobrecargados pueden requerir un enfriador de aire entre el compresor y el múltiple de entrada.

Habitualmente, el **tamaño del motor** se designa en función del valor nominal de la potencia (caballaje), más que del tamaño físico del marco del motor. El tamaño del marco se determina según el diámetro interno del cilindro, la longitud de la carrera y el número de cilindros. La potencia nominal de un marco determinado varía con la práctica industrial y el empleo que se le dé. Así, pues, los motores de automóvil se diseñan para desarrollar entre 0.54 y 0.95 hp/in³ de desplazamiento del pistón, mientras que las unidades diesel industriales se limitan a la gama comprendida entre 0.045 y 0.175 hp/in³.

El **valor nominal del motor** refleja la práctica industrial de que se trata. La potencia del motor de automóvil es el caballaje máximo o de pico desarrollado en un montaje de prueba, mientras que la clasificación nominal de un motor industrial se basa, casi siempre, en una carga continua.

Los motores industriales se fabrican en gran variedad de tamaños de marco, cada uno de los cuales se fabrica en varias clasificaciones de potencia y velocidad. El mismo marco del motor puede impulsar un generador de 900 kW a 900 rpm, o un generador de 600 kW a 600 rpm,

utilizando pistones má
cación de más alta velo
mente para 746 kW (
utilizando cabezas de
hp), mediante una sob
gama de potencia de
(1320 hp). Un marco
tes salidas haciendo
motor de 10 cilindros
hp) y 2088 kW (2800
respectivamente, 6 y
mismo diseño básico,
tos para gran varieda

El valor nominal
Unidos se publica, ca
el mar y a una tempe
que las condiciones a
que los motores funci
bustión y, en consecu
nal a la densidad del

Características d
de los motores de cc
sea cual fuere el con
tro ciclos. Para hace
carga, que puede va
dentro de la gama d
entrada de combust
regulador para cont
tener la velocidad c
la instrumentación
de la potencia o el p
tuar el arranque, la
ubicación remota, l
unidad en el caso d
miento o del flujo d

El arranque se re
baste para lograr el e
da. Los motores peq
tores eléctricos u otr
de mayor tamaño e
que los cilindros del
aire a alta presión p
tienen, casi siempre,
Los requisitos de ai
bre)/hp almacenado
kN/m² (250 a 300 lb
disparo, o bien logr
de arranque y el dep

Las característic
bién por los requisi
desarrollar un máx
ascender por colin
par de esfuerzo an
dad y, por lo tanto,
cargas para dicha
constante necesita
velocidades de ope
bilidad del motor
cionar de tal maner

La sobrecarga s
del motor o la sali
cial y la razón de
de sistema de sobr
res sobrecargados
velocidad y veloci
no sobrecargados,
eficientes y caract

utilizando pistones más ligeros y refacciones especiales para una aplicación de más alta velocidad. Un motor que se haya diseñado originalmente para 746 kW (1000 hp) se puede elevar a 820 kW (1100 hp), utilizando cabezas de compresión más altas y más aún, a 984 kW (1320 hp), mediante una sobrecarga. Por lo tanto, un marco puede cubrir una gama de potencia de 447 kW (600 hp) (60% de velocidad) a 984 kW (1320 hp). Un marco de motor también se puede diseñar para diferentes salidas haciendo variar la cantidad de cilindros: por ejemplo, un motor de 10 cilindros de 2610 kW (3500 hp) desarrolla 1566 kW (2100 hp) y 2088 kW (2800 hp) con el mismo grado de eficiencia, utilizando, respectivamente, 6 y 8 cilindros. Esto permite al fabricante emplear el mismo diseño básico, las mismas herramientas e idénticos aditamentos para gran variedad de clasificaciones.

El valor nominal de potencia de motores industriales de Estados Unidos se publica, casi siempre, para un nivel de 457 m (1500 ft) sobre el mar y a una temperatura ambiente de 32°C (90°F). Es importante que las condiciones atmosféricas de la instalación se especifiquen, ya que los motores funcionan con un exceso muy pequeño de aire de combustión y, en consecuencia, la máxima salida de potencia es proporcional a la densidad del aire.

Características de operación Las características de operación de los motores de combustión interna son básicamente las mismas, sea cual fuere el combustible utilizado o si el motor es de dos o cuatro ciclos. Para hacer variar la velocidad o la capacidad portadora de carga, que puede variar de 0 al torque total para todas las velocidades dentro de la gama de operación, lo único que se necesita es alterar la entrada de combustible. Los motores de mayor tamaño utilizan un regulador para controlar la razón de entrada del combustible y mantener la velocidad constante en condiciones variables de carga. Con la instrumentación auxiliar, el regulador se utiliza como controlador de la potencia o el proceso. Ese tipo de instrumentación permite efectuar el arranque, la detención y hacer funcionar el motor desde una ubicación remota, lo que también permitirá apagar por completo la unidad en el caso de que se presente una pérdida del agua de enfriamiento o del flujo de aceite lubricante.

El **arranque** se realiza haciendo girar el motor con una velocidad que baste para lograr el encendido y una operación subsecuente autosostenida. Los motores pequeños se ponen en funcionamiento por medio de motores eléctricos u otras unidades más pequeñas de arranque manual, y los de mayor tamaño están provistos de válvulas especiales, que permiten que los cilindros del motor funcionen como motores de aire empleando aire a alta presión para hacer girar la unidad. Los motores de arranque tienen, casi siempre, un tamaño del 5 al 10% del valor nominal del motor. Los requisitos de aire para el arranque son 0.014 m^3 (0.5 ft^3 de aire libre)/hp almacenado a una presión manométrica de 1723 kN/m^2 a 2068 kN/m^2 (250 a 300 lb/in^2). Por lo común, se presuponen tres arranques por disparo, o bien logrado, para determinar el tamaño del compresor de aire de arranque y el depósito de almacenamiento de aire.

Las características de operación de los motores son afectadas también por los **requisitos de servicio**. Los motores de automóviles deben desarrollar un máximo esfuerzo angular con velocidades bajas para ascender por colinas; los motores marinos sólo deben desarrollar un par de esfuerzo angular pleno cuando la hélice gira a plena velocidad y, por lo tanto, requieren la máxima eficiencia posible a todas las cargas para dicha velocidad; las compresoras reciprocantes a presión constante necesitan un par de fuerza angular pleno en toda la gama de velocidades de operación, por lo que presentan un problema de inestabilidad del motor con velocidades reducidas. El motor se debe seleccionar de tal manera que se satisfagan estos requisitos de servicio.

La **sobrecarga** se utiliza primordialmente para mejorar la eficiencia del motor o la salida de potencia, pero el funcionamiento a carga parcial y la razón de respuesta a los cambios de carga dependen del tipo de sistema de sobrecarga utilizado. Algunos sistemas producen motores sobrecargados que tienen las mismas características de par angular-velocidad y velocidad de respuesta a los cambios de carga que los motores no sobrecargados, en tanto que otros generan respuestas peores o más eficientes y características de velocidad-par de rotación distintas.

Mantenimiento y confiabilidad El mantenimiento preventivo requiere que todos los motores se apaguen a intervalos periódicos para su inspección y reparación. Para tener un mantenimiento adecuado en motores para trabajos pesados, la disponibilidad es superior al 97%, con costos de mantenimiento de 1.50 a 3 dólares por caballo de fuerza-año, y un consumo de aceite de lubricación de 1 a 2 gal/hp-año.* Aunque esto representa un alto grado de seguridad, los periodos de interrupción de motores para trabajos pesados son más frecuentes que los de los motores eléctricos o las turbinas de vapor.

El funcionamiento satisfactorio de un motor se asegura manteniendo un libro de registros que permita comparar las características actuales con registros anteriores de: **1**) expulsión del cilindro, agua de enfriamiento y temperatura de salida del sobrecargador para cargas similares, **2**) sonidos de funcionamiento y producción de humos en la salida, y **3**) eficiencia y pérdidas del motor.

Los dispositivos de seguridad mínima para un motor industrial son el regulador y dispositivos independientes de sobrevelocidad y presión de aceite baja. Los motores que funcionan en zonas no supervisadas deben tener los medios necesarios para que se detengan en caso de que sufran fallas en el agua de enfriamiento o el aceite de lubricación, y para temperaturas excesivas en la salida o en el agua de cubierta. Los motores que funcionan en zonas supervisadas deben estar provistos de instrumentos, para que el operador verifique su funcionamiento.

Características del combustible Los combustibles utilizados en los motores industriales del tipo de combustión interna son, por lo común, derivados del petróleo o, de lo contrario, gases naturales o elaborados. Los alcoholes y las mezclas de gasolina y alcohol o benzol también se utilizan a menudo. Un motor de gasolina funciona satisfactoriamente con cualquier tipo de combustible que esté libre de polvo y no sea corrosivo (es decir, que contenga menos de 0.6 granos por ft^3), que no detone, no registre preignición durante la carrera de compresión y produzca el calor suficiente al quemarse para desarrollar la potencia necesaria.

En general, el combustible debe tener una capacidad calorífica superior a 600 Btu/ft^3. Los motores de gasolina requieren, además, que el combustible se vaporice dentro del carburador. Los diesel queman cualquier combustible que se pueda inyectar, a condición de que se queme en condiciones controladas, posea la suficiente lubricidad para lubricar los émbolos de inyección, generen el calor suficiente y carezcan de granos abrasivos, contenga menos del 3% de azufre, 70 ppm de vanadio y 125 ppm de pentóxido de vanadio. La mayor parte de los motores diesel utilizan aceites combustibles número 2 o número 5. Este último se debe calentar a una viscosidad de 50 a 70 S.S.U. [121°C (250°F), aproximadamente] para obtener las características de lubricación e inyección adecuada en el inyector.

Los combustibles gaseosos que contienen fracciones cuya temperatura de ignición es menor que la del metano pueden requerir el empleo de cabezales de baja compresión y la deaireación del gas del motor.

El método para informar sobre el consumo de combustibles varía entre las diferentes industrias y también de un país a otro. Las asociaciones comerciales recomiendan habitualmente algún procedimiento particular. Así pues, la Diesel Engine Manufacturers Association de Estados Unidos, calcula las eficiencias basándose en el valor menor de calentamiento (LHV) para combustibles gaseosos y el valor superior de calentamiento para combustibles de aceite. Una de las prácticas generales es estipular el funcionamiento de un motor de gas en Btu/hp-h (LHV) y el funcionamiento del motor de aceite, expresado en libras de combustible consumido por caballo de potencia-hora. En el caso de plantas de generación de electricidad, el consumo de combustible se estipula en kilowatts. Los datos auxiliares que se incluyen con los cálculos de eficiencia del motor varían según la práctica industrial que en la actualidad prevalece.

Economía de combustible y recuperación de calor Las altas eficiencias obtenidas por los motores modernos sobrecargados y de alta compresión, ya sea de diesel o de gas, se pueden alcanzar sólo en plan-

* Si se desean detalles más minuciosos sobre los costos de funcionamiento industrial, consúltese la obra *Annual Oil and Gas Engine Power Costs*, publicada por American Society of Mechanical Engineers. Los fabricantes de motores proporcionan también programas recomendados para efectuar un mantenimiento preventivo.

TABLA 24-4 Balance térmico aproximado para motores de gas*

	Dos ciclos				Cuatro ciclos			
	Húmedo†		Seco†		Húmedo atmosférico		Seco sobrecargado	
Tipo de múltiple	B.t.u./hp	%	B.t.u./hp	%	B.t.u./hp	%	B.t.u./hp	%
Entrada de calor (LHV)	7200	.....	6900	.....	7700	.....	6200	
Trabajo	2545	35.4	2545	36.9	2545	33.1	2545	41.0
Camisa o chaqueta	1700	23.6	1200	17.4	2200	28.6	1250	20.2
Aceite lubricante	460	6.4	500	7.2	450	5.8	300	4.8
Escape	2095	29.1	1795	26.0	2300	29.9	1685	27.2
Radiación	400	5.5	860	12.5	205	2.6	200	3.2
Combustión	.....	.....	.....	.....	.....	.....	220	3.5

*Por cortesía de Cooper-Bessemer Corp. Para convertir unidades térmicas británicas por caballo de potencia (Btu/hp) en kilojoules por kilowatt, multiplíquese por 1.4148.

†El tipo húmedo se refiere a los múltiples enfriados por agua y el tipo seco a los múltiples por aire.

tas de vapor de recalentamiento a alta presión, muy grandes, o mediante ciclos muy complicados en turbinas de gas. Las siguientes eficiencias (LHV), basadas en combustible de metano para motores de gas y combustible de aceite para motores diesel, se pueden emplear para calcular los consumos de combustible: 63 a 298 kW (85 a 400 hp), 28%; 328 a 597 kW (440 a 800 hp), 32%; 597 a 2237 kW (800 a 3000 hp), 36% por encima de 2461 kW (3300 hp), 38%.

Los costos de combustibles de una planta que se asignan a la producción de potencia se pueden reducir cuando las pérdidas de calor se aprovechan para algún proceso o para otro tipo de calentamiento. Las pérdidas de calor de un motor, como porcentajes de entrada de calor (LHV), son 1) enfriamiento del aceite de lubricación, de 5 a 7% disponible a 82°C (165°F), 2) enfriamiento de la cubierta, 17 a 30% disponible como agua a 82°C (165°F), o con un enfriamiento en fase de vapor como vapor a 103 kN/m^2 (15 lb/ft^2 manométrica), 3) gases de expulsión de un motor, 26 a 30% disponible con, aproximadamente, la mitad de este valor a la temperatura suficiente para generar vapor a 689.5 kn/m^2 (100 lb/in^2 manométrica), en calderas de calor de desecho. En la tabla 24-4 se dan algunos datos sobre el equilibrio calorífico en motores de gas.

Llevar a efecto el enfriamiento en la fase de vapor da por resultado una reducción del costo del sistema de enfriamiento, un aumento en la recuperación calorífica y puede mejorar una mayor eficiencia del motor.

Con velocidad plena, el consumo de combustible decrece linealmente con la reducción de la carga, adquiriendo en una carga cero un valor correspondiente a un tercio o un cuarto del consumo a carga plena y sin ningún potencial para la recuperación calorífica en la salida. Las pérdidas de calor en la cubierta de agua se reducen del 20 al 40% a una carga cero. El consumo de combustible al par de rotación nominal es casi proporcional a la velocidad. Con media velocidad, la recuperación de la salida disminuye a menos de 1/2 y el enfriamiento con agua de cubierta se convierte en más de la mitad de los valores de esfuerzo angular pleno.

Instalación y costos La instalación de un motor incluye el equipo auxiliar necesario para su funcionamiento como, por ejemplo, bombas de lubricación y almacenamiento auxiliar, equipo de filtración y enfriamiento, bombas para agua de cubierta con tanque de expansión y enfriador, tanques de aire para el arranque y compresoras, tubería y pantallas para el aire de entrada, tubería para el aire de salida y silenciadores o calderas de calor de desecho, un sistema de combustible que, en el caso de los motores diesel, incluye un tanque de uso normal, filtros, bombas, calentadores y un tanque principal de almacenamiento, sistema de ignición o émbolos de inyección de combustible, así como torres de enfriamiento o radiadores. Los motores diesel que operan con aceites combustibles pesados de tipo residual tienen sistemas de dos combustibles, uno para aceite pesado para el funcionamiento normal y uno de aceite ligero para el arranque y la detención.

Las tuberías e instalaciones marinas se disponen con frecuencia de manera que el motor impulse todo el equipo auxiliar por medio del cigüeñal, utilizando cadenas y bandas en V. Sin embargo, la práctica de una planta de proceso consiste en que todos los elementos auxiliares tengan una propulsión independiente, utilizando bombas de emergencia para minimizar el tiempo improductivo del motor.

Los cimientos se deben diseñar para que puedan controlar el **movimiento de vibración** que resulta de las masas reciprocantes. Los fabricantes del motor recomiendan las dimensiones de los cimientos; pero, en general, sus recomendaciones no toman en cuenta las propiedades del subsuelo y se basan en hacer que el peso combinado del motor y los cimientos sea bastante grande para limitar la vibración. Cuando es factible, los cimientos deben estar separados de la estructura del edificio. En muchos casos, la vibración del motor no producirá daños; sin embargo, se considera como buena práctica reducirla, siempre que sea posible. Incluso cuando la vibración no aumente ninguna fuerza del motor, hará que las uniones y los pernos de las tuberías, etc., se vayan soltando poco a poco.

También la vibración de torsión genera, a veces, problemas y provoca variaciones de presión en los cilindros que pueden producir pares cíclicos, con armónicos que varían de media velocidad hasta de 10 a 12 veces la velocidad de funcionamiento. Para evitar dificultades de operación, las frecuencias críticas de torsión del motor, combinado con el equipo impulsado, se deben calcular o medir para asegurar que las velocidades de funcionamiento se alejen de los va-

TABLA 24-5 Costos comparativos de instalación de compresores de motor integral para estaciones de oleoductos y plantas de proceso*

	Estación de oleoducto	Planta de proceso
A. Tierras y mejoramientos	$ 328 000	$ 48 500
B. Estructuras	648 000	346 000
C. Pruebas	25 000	25 000
D. Equipo	4 900 000	3 625 000
Subtotal	$5 901 000	$4 044 500
Se suma un 10% de gastos generales y costos de campo no distribuidos	590 100	404 450
Subtotal	$6 491 100	$4 448 950
Se suma 5% para contingencias	324 555	No se utiliza
Total	$6 815 555	$4 448 950
Costo por caballo de potencia (hp)	487	318

*Se suponen 10 unidades para un total de 10.4 MW (14 000 hp). Año tomado como base: 1981.

lores críticos, o insta
contrario, que el equi
tantes.

El costo de los mot
congruente si se calc
siempre y cuando los
publicadas sobre cost
cia, a error, ya que con
cia más elevadas con

En la tabla 24-5 se
res, que se pueden p
los costos de instala

GENERADOR I

El generador de gas
cillo que utiliza "ci
potencia a sus posici
tipo de motor diese
variable, en el cual c
sor de aire para pro
desarrollar la poten
ciaron en 1951 con
generadores de gas
aplicaciones subsec
sores de plantas pe
des de propulsión n

Características
tencia son similares
teriormente en esta
similar a un compr
cidades de pistón, c
tituyen un motor di
en la eliminación d

La ausencia del
libre ciertas caract
variable y velocida
de potencia. Aunq
en los cojinetes, nc
medio del ciclo, ca
diseños actuales, l
dio de un recubrim
de aceite para enfi
llos.

Potencialmente
eficiencia superio
de sobrecarga mu
de vida muy corta
a que se buscaban
modernos tienen
frenado · h, que se
superior a los valc

Característica
ciclo de operació
presor) es un siste
rebote proporcio
peso. La razón n

lores críticos, o instalar amortiguadores de vibración, o bien, de lo contrario, que el equipo se diseñe para los esfuerzos cíclicos resultantes.

El costo de los motores y los equipos auxiliares es razonablemente congruente si se calcula una base de dólares por caballo de potencia, siempre y cuando los detalles esenciales sean los mismos. Las cifras publicadas sobre **costos de motores instalados** inducen, con frecuencia, a error, ya que con sobrecargas se pueden obtener salidas de potencia más elevadas con el mismo tamaño de motor, lo cual reduce también las necesidades de agua de enfriamiento y los requisitos de cimientos. Los costos de un compresor de tubería incluyen con frecuencia las tuberías, los edificios, etc., y en algunas plantas de proceso, el agua de enfriamiento, que se ha utilizado y cargado a la operación de proceso, se puede reutilizar para enfriar un motor sin costo alguno. Es obvio que las predicciones de los costos generales deben emplearse con precaución, a menos que se conozca con detalle la base correspondiente. No obstante, como cifras preliminares, se sugieren las siguientes cantidades (basándose en datos de 1981):

Compresores de motor integral:	
Sin instalar y sin equipos de auxiliares	\$200/hp
Costo instalado con auxiliares y agua de enfriamiento	\$338/hp
Costos instalados de unidades grandes, con agua de enfriamiento suministrada por unidades de procesamiento	\$313/hp
Generadores diesel o motores de gas:	
Sin instalar	\$169/kW
Instalado	\$300-\$338/kW

En la tabla 24-5 se estipulan los costos para la instalación de motores, que se pueden prorratear para sacar estimaciones preliminares de los costos de instalación.

GENERADOR DE GAS DE PISTÓN LIBRE

El generador de gas de pistón libre es un dispositivo relativamente sencillo que utiliza "cilindros de rebote" para regresar dos pistones de potencia a sus posiciones iniciales. Los pistones de potencia forman un tipo de motor diesel muy sobrecargado, de pistón opuesto y carrera variable, en el cual cada pistón de potencia impulsa un pistón compresor de aire para producir aire presurizado que utiliza la turbina para desarrollar la potencia necesaria. Las instalaciones industriales se iniciaron en 1951 con una planta generadora de electricidad, utilizando generadores de gas de pistón libre para impulsar una turbina. Entre las aplicaciones subsecuentes se incluyen estaciones de bombeo, impulsores de plantas petroquímicas, propulsores de locomotoras y unidades de propulsión marinas.

Características de diseño Las características de la turbina de potencia son similares a las de las turbinas de vapor que se analizan posteriormente en esta sección. El compresor de aire del gasificador es similar a un compresor de aire reciprocante y sólo difiere en las velocidades de pistón, que son superiores. Los cilindros de potencia constituyen un motor diesel de pistón opuesto y dos ciclos, que solo difiere en la eliminación del cigüeñal.

La ausencia del cigüeñal le confiere al generador de gas de pistón libre ciertas características singulares, a saber, una carrera de pistón variable y velocidad de pistón independiente de la turbina u otra salida de potencia. Aunque la eliminación del cigüeñal evita cargas pesadas en los cojinetes, no elimina el problema de las altas temperaturas promedio del ciclo, características en motores muy sobrecargados. En los diseños actuales, los cilindros de potencia tienen enfriamiento por medio de un recubrimiento de agua y se hacen circular grandes cantidades de aceite para enfriar los pistones y minimizar el desgaste de los anillos.

Potencialmente, una planta de turbina de pistón libre opera con una eficiencia superior a la de un diesel; pero esto se logra sólo a presiones de sobrecarga muy elevadas, que tienen como resultado una duración de vida muy corta de los anillos. Las fallas iniciales se debieron quizás a que se buscaban las máximas eficiencias posibles; pero los modelos modernos tienen un consumo de combustible de 0.38 a 0.40 lb/hp de frenado · h, que se considera como una buena eficiencia, aunque algo superior a los valores correspondientes a los motores diesel.

Características de operación En la figura 24-12 se describe el ciclo de operación. En esencia, un gasificador de pistón libre (o compresor) es un sistema de masa y resorte en el cual el aire del cilindro de rebote proporciona el efecto de resorte y los pistones son la masa o el peso. La razón resorte-masa determina la velocidad en carreras por minuto. Se obtienen velocidades mínimas sin carga de 400 ciclos/min, a presiones bajas del cilindro de rebote y velocidades de 600 ciclos/min a presión plena. Al hacer variar la entrada de combustible, se cambian las fuerzas disponibles y se genera una alteración en la carrera del pistón y la velocidad, lo cual determina la cantidad de aire que se comprime.

En un sistema simple que consta de un gasificador y una turbina, la cantidad de combustible se puede reducir de los niveles necesarios para una potencia plena hasta un punto en que el compresor de pistón libre se haga inestable. Cualquier reducción subsiguiente de la potencia se obtendrá sólo utilizando un controlador de intervalo dividido, que despida gas a la atmósfera. El controlador de intervalo dividido funciona basándose en la velocidad de la turbina o en algún factor de proceso, como, por ejemplo, el flujo o la presión.

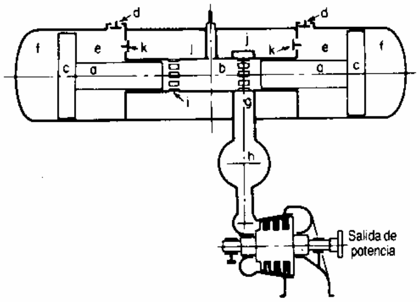


FIG. 24-12 Compresor de pistón libre. Cuando los pistones (a) se encuentran en su posición más interna, el combustóleo se inyecta dentro del cilindro de potencia (b); el aumento de presión resultante del cilindro de potencia (b) mueve los pistones de potencia (a) y los pistones del compresor de aire (c) en dirección hacia afuera, succionando aire a través de las válvulas (d) hacia el cilindro del compresor de aire (e) y, al mismo tiempo, comprimiendo aire del cilindro de rebote (f). Cerca del extremo de la carrera del pistón, las aberturas de expulsión (g) quedan abiertas, lo cual permite que los productos de combustión salgan a través de la tubería (h) hacia la turbina de potencia. El movimiento subsecuente del pistón de potencia deja al descubierto las aberturas para la admisión de aire (i), permitiendo que el aire pase de la cámara (j) al cilindro de potencia (b), atravesando las aberturas de expulsión hasta la turbina de potencia, a través de la tubería de salida (h). El cilindro de potencia (b) posee ahora una carga de aire de renuevo. La presión de los cilindros de rebote (f) devuelve los dos pistones de potencia (a) y sus cilindros del compresor de aire conectados (c) hacia el centro, y movimiento hacia adentro del pistón del compresor de aire (c) descarga el aire a través de la válvula (k) dentro de la cámara (j). El movimiento hacia adentro que ejecutan los pistones de potencia (a) comprime el aire dentro del cilindro de potencia (b), dejándolo listo para una nueva carrera de potencia.

En plantas grandes de una sola turbina, cada gasificador se conecta, casi siempre, a un grupo separado de boquillas de turbina de primera etapa. Para reducir la salida de potencia, la entrada de combustible se reduce para los gasificadores, o los gasificadores sucesivos se pueden interrumpir para mantener el funcionamiento de alta eficiencia de los gasificadores que quedan en funcionamiento. Las válvulas de limpieza se emplean para operaciones transitorias a carga parcial.

En grandes instalaciones de varias turbinas, los gasificadores se descargan en un cabezal común, cuya presión se mantiene gracias a un controlador de presión de intervalo dividido, que ubica las estanterías de combustible y las válvulas de limpieza. Cada turbina se controla por medio de su regulador, que estrangula el gas conforme es necesario.

En cada caso, las características de operación dependen de la configuración del control. Cuando el gasificador se regula por medio de un controlador de contrapresión y la turbina mediante su propio regulador, el funcionamiento de la turbina de potencia es similar al de una turbina de vapor que funciona con vapor a presión constante. Los gasificadores controlados por un regulador de turbina responden rápidamente a las oscilaciones de la potencia, conforme los cambios en el ajuste del combustible varían a lo largo de la siguiente carrera. La única demora en la respuesta es el intervalo requerido para presurizar el cabezal del gas.

La reducción de la presión de salida del gasificador genera una potencia de salida de turbina menor y, al mismo tiempo, presiones eficaces medias más bajas, con lo cual aumenta la duración de vida de los anillos. Por el contrario, un incremento en la presión da como resultado una mayor potencia de turbina y una duración menor de los anillos; pero los gasificadores no perderán velocidad hasta obtener contrapresiones elevadas. Los sistemas de compresión de aire absorben casi toda la salida de trabajo de los pistones de potencia. A presiones de salida normales, el compresor de aire descarga un exceso de éste a través de los cilindros de potencia. Cuando se tiene una gran contrapresión, la eficiencia volumétrica del compresor disminuye, haciendo que llegue menos aire a los cilindros de potencia. El motor sigue funcionando con una contrapresión creciente, hasta que se alcanza la presión de pérdida de velocidad.

Instalación y operación Las fuerzas de inercia se equilibran mediante los dos pistones que se mueven simultáneamente en direcciones opuestas, con lo cual se minimizan las necesidades de cimentación y, sin un cigüeñal, las vibraciones de torsión mecánica no existen. El flujo de salida de gas pulsante implica los mismos problemas que se encuentran en los compresores reciprocantes, en lo que respecta a vibraciones de excitación con cierta resonancia en las tuberías de conexión.

Con un solo gasificador conectado a la turbina, la fluctuación de la presión puede excitar vibraciones de torsión dentro de la turbina y el equipo de impulsión. Para evitar la resonancia, las frecuencias críticas de torsión de la turbina y el equipo impulsado deben diferir de las frecuencias de las fuerzas de excitación, que son múltiplos de las carreras por minuto. Las frecuencias de excitación de instalaciones de gasificadores múltiples varían desde una condición en que todas las unidades se disparan en forma simultánea, hasta diferentes patrones, que comprenden el encendido espaciado entre unidades.

Los gasificadores se deben desconectar para someterlos a un mantenimiento periódico y el porcentaje de disponibilidad de una sola unidad parece ser menor que el de los motores diesel. No obstante, los impulsores ofrecen la gran disponibilidad habitual de las turbinas y, en consecuencia, el empleo de gasificadores auxiliares confiere un alto grado de disponibilidad de una planta completa.

Combustible y recuperación de calor Los productos de combustión de un gasificador contienen hasta 15% de oxígeno (por volumen). Ese oxígeno se utiliza para encender una caldera presurizada que va antes que la turbina o en una caldera a presión atmosférica dentro de la salida de la turbina. También es posible calentar sencillamente los gases y lograr con ellos una salida de potencia de turbina más alta. Estas configuraciones generarán mayor eficiencia en la planta, pero también se incrementa el costo de inversión.

La recuperación de calor del agua de enfriamiento y los circuitos de aceite y de lubricación se limita a las temperaturas bajas [49°C (120°F)], que son mucho más reducidas que para los diesel.

La mayor parte de las instalaciones utilizan combustible diesel número 2 y algunas informan que han utilizado con éxito combustibles más pesados. La presión de aire más elevada favorece una combustión más completa, por lo cual algunas autoridades afirman que el gasificador puede quemar aceites más pesados que el diesel. Sin embargo, esta condición de presión favorable se contrarresta, en parte, debido al breve tiempo en el que se realiza la combustión cuando el pistón se desplaza a altas velocidades.

TURBINAS DE VAPOR

Las turbinas de vapor se dividen en dos categorías generales: las que se utilizan para generar **energía eléctrica** y las unidades para fines generales que se emplean para mover bombas, compresores, etc., las cuales a menudo se denominan **turbinas de propulsión mecánica**.

En la figura 24-13 se ilustra en general, la relación de la capacidad en función de la velocidad. A 1800 y 3600 rpm se encuentran las transmisiones de generador de tipo turboeléctrico, con límites de capacidad superiores a los valores mayores de la gráfica. La mayor parte de las aplicaciones de transmisión mecánica se localizan dentro de la zona sombreada y las capacidades superiores a la línea continua son especiales y poco acostumbradas.

La presión del vapor de entrada se ubica habitualmente dentro de la escala de 1723 kN/m^2 (250 lb/in^2 manométricas), con un sobrecalentamiento de cero, hasta 5860 kN/m^2 (850 lb/in^2 manométricas) a 482°C (900°F). Se han construido algunas turbinas que funcionan a 35 kN/m^2 (5 lb/in^2 manométricas) con sobrecalentamiento cero, partiendo de una salida de proceso. En generadores de turbina de gran tamaño, es común encontrar presiones manométricas de 10 342, 12 410 y 16 547 kN/m^2 (1500, 1800 y 2400 lb/in^2 manométricas) y algunos operan a presiones supercríticas de 24 131 kN/m^2 (3500 lb/in^2 manométricas) y 34 474 kN/m^2 (5000 lb/in^2 manométricas). Las plantas eléctricas que generan vapor con reactores nucleares generan vapor saturado en la escala de 1379 a 6895 kN/m^2 (200 a 1000 lb/in^2 manométricas). Las primeras unidades eran de 125 megawatts, pero en la actualidad el tamaño más común es de 250 a 1000 megawatts. Estas unidades tienen cubiertas múltiples y hojas de 1.32-m (52 in) de longitud, en etapas de salida de 1800 rpm.

TIPOS DE TURBINAS DE VAPOR

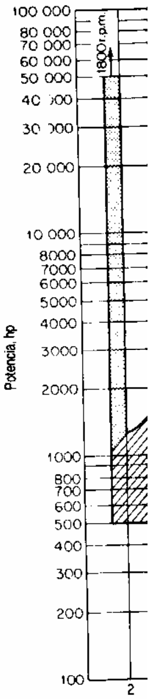
Turbina de condensación directa Todo el vapor penetra en la turbina a una presión y sale también de la misma, por el conducto de expulsión, a una presión inferior a la de la atmósfera.

Turbinas directas sin condensación Todo el vapor penetra a la turbina a presión, y todo el vapor sale de la misma por el conducto de expulsión a una presión igual o mayor que la atmosférica.

Turbina de extracción no automática, de condensación o no condensación El vapor se extrae de una o más etapas; pero sin contar con medios para controlar la presión del vapor extraído.

Turbina de extracción automática, de condensación o no condensación El vapor se extrae de una o más etapas; pero sin contar con medios para controlar la presión del vapor extraído.

Turbina de extracción e inducción automática, de condensación o no condensación El vapor se extrae de una o más etapas, o bien, se induce a las mismas utilizando medios para controlar las presiones del vapor de extracción o inducción.



ica no existen. El flu-
problemas que se en-
que respecta a vibra-
tuberías de conexión.
a, la fluctuación de la
atro de la turbina y el
is frecuencias críticas
eben diferir de las fre-
iltiplos de las carreras
stalaciones de gasifi-
i que todas las unida-
erentes patrones, que
des.
someterlos a un man-
lidad de una sola uni-
sel. No obstante, los
al de las turbinas y, en
ares confiere un alto

roductos de combus-
ígeno (por volumen).
a presurizada que va
nosférica dentro de la
sencillamente los ga-
irbina más alta. Estas
planta, pero también

nto y los circuitos de
raturas bajas [49°C
los diesel.
mbustible diesel nú-
n éxito combustibles
rece una combustión
rman que el gasifica-
el. Sin embargo, esta
parte, debido al bre-
ndo el pistón se des-

stas unidades tienen
ongitud, en etapas de

vapor penetra en la
, por el conducto de
era.
el vapor penetra a la
a por el conducto de
osférica.
densación o no con-
pas; pero sin contar
traído.
ensación o no con-
pas; pero sin contar
traído.
a, de condensación
nás etapas, o bien, se
olar las presiones del

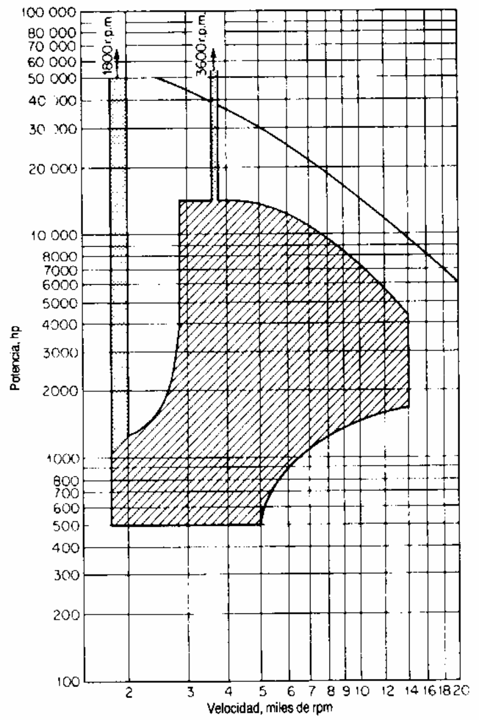


FIG. 24-13 Índice de capacidad de una turbina de vapor en función de la velocidad. Para convertir caballos de potencia (hp) en watts, multiplíquese por 745.7.

Turbina de presión mixta, condensación o no condensación El vapor entra en la turbina a dos o más presiones, atravesando aberturas de entrada separadas, con medios para controlar las presiones del vapor de entrada.

Turbinas de recalentamiento Después que el vapor se ha expandido a través de varias etapas, sale de la turbina y pasa por una sección de la caldera en donde se somete a un sobrecalentamiento. El vapor sobrecalentado se devuelve entonces a la turbina para su expansión posterior.

OPCIONES DE ETAPAS Y VÁLVULAS

La turbina de **una sola etapa y una sola válvula** es el tipo más sencillo que se tiene y la que ofrece las aplicaciones más variadas. En la cámara de vapor hay una sola válvula reguladora, que se opera directamente mediante un regulador centrífugo de tipo mecánico. Después de pasar por la válvula, el vapor se expande a través de las boquillas, en donde gana velocidad e impulso para mover las ruedas, realizando una acción de empuje contra las hojas. El eje se sella mediante anillos de carbono y los cojinetes se lubrican por medio de anillos. La mayor parte de las aplicaciones son inferiores a 1119 kW (1500 hp) y tienen velocidades menores que 5500 rpm con 4137 kN/m^2 (600 lb/in^2 manométrica) o a presiones de vapor inferiores. Mediante ciertos cambios, es factible alcanzar límites superiores del orden de 1492 kW (2000 hp), 10 000 rpm y 8274 kN/m^2 (1200 lb/in^2 manométricas).

La **turbina de una sola válvula y etapas múltiples** se utiliza bastante para mover compresores y bombas en el intervalo de 1119 a 4474 kW (1500 a 6000 hp). En la figura 24-12 se muestra una sección de turbina de este tipo. El extremo de entrada de esta turbina de etapas múltiples conserva la configuración general que incluye caja de cojinetes, regulador y cámara de vapor, como se tiene en la turbina de una sola etapa y una sola válvula. La cubierta se extiende para abarcar las etapas adicionales, y la última hilera de hojas y la abertura de salida tienen un tamaño grande para contener el volumen del vapor de salida a una presión de condensación baja, que puede ser de 6895 a 13 790 N/m^2 (1 o 2 lb/in^2 absolutas).

La **turbina de etapas y válvulas múltiples** se emplea, a menudo, en el intervalo en que la turbina de una sola válvula podría manejar la carga. La ventaja adicional que se tiene es una mayor eficiencia a carga parcial y un mejor control de la velocidad. Las válvulas múltiples son la configuración universal para salida de caballaje más altas, para evitar el empleo de una válvula reguladora de gran tamaño que pueda causar problemas de válvulas. No existe una línea divisoria bien definida y hay situaciones especiales que admiten que se utilicen unidades de una sola válvula al doble del límite antes citado. En las turbinas de válvulas múltiples se emplean diferentes configuraciones de válvulas y la complejidad aumenta con las condiciones de vapor y el volumen. A continuación se mencionan las principales configuraciones empleadas al aumentar el flujo de vapor:

1. Cámara de vapor en la mitad superior, con válvulas de elevación de barra
2. Cámara de vapor en la mitad superior, con válvulas de elevación de levas
3. Cámara de vapor tanto en la mitad superior como en la inferior, con elevación de levas
4. Cámara de vapor separada, montada lateralmente

La conmutación de una configuración a otra varía de un fabricante a otro. La configuración de la cámara de vapor y válvulas independientes montadas lateralmente es característica de transmisiones de generador de gran tamaño. Asimismo, al aumentar el flujo, adquiere un volumen excesivo para una sola hilera de hojas de salida, de manera que se utilizan cajas con flujo doble o salidas múltiples.

TIPOS DE ÁLABES Y DETERMINACIÓN DE ETAPAS

En la figura 24-15, se ilustra una etapa de turbina en la cual el vapor a la presión p_1 penetra en la boquilla o el álabe estacionario, se expande a una presión menor p_2 y sale de la boquilla con una velocidad C_1. La hilera rotatoria se mueve con una velocidad , de manera que el vapor penetra a dicha hilera con una velocidad relativa w_1 y sale de la misma con velocidad relativa w_2. La presión en el lado de salida de la hilera de rotación es p_3.

Según sea la relación entre las presiones p_1, p_2 y p_3, la etapa se clasifica ya sea como de impulso o reacción.

Para una **etapa de impulso** (Rateau o Curtis), p_2 es igual que p_3 o bien, sólo ligeramente superior y w_2 es un poco menor que w_1 originada por la pérdida de fricción en el pasaje del álabe. El área de salida a_r, de la hilera rotatoria es de 50 a 74% mayor que el área de salida a_s de la hilera estacionaria, con objeto de dar paso a la misma cantidad de vapor a un volumen específico superior.

El trabajo realizado en la etapa es el empuje del vapor sobre los álabes, que es la variación de momento o cantidad de movimiento del vapor conforme cambia de dirección de C_1 a C_2, utilizando la proyección periférica de las velocidades. Por ende, es conveniente que los ángulos α y β sean pequeños.

En una **etapa de reacción**, el área de salida a_r se limita, reduciendo el ángulo β, lo cual incrementa la presion p_2, quizá hasta un punto intermedio entre p_1 y p_3. La velocidad de salida w_2 es ahora mayor que la velocidad de entrada del álabe w_1, debido a la caída de presión de p_2

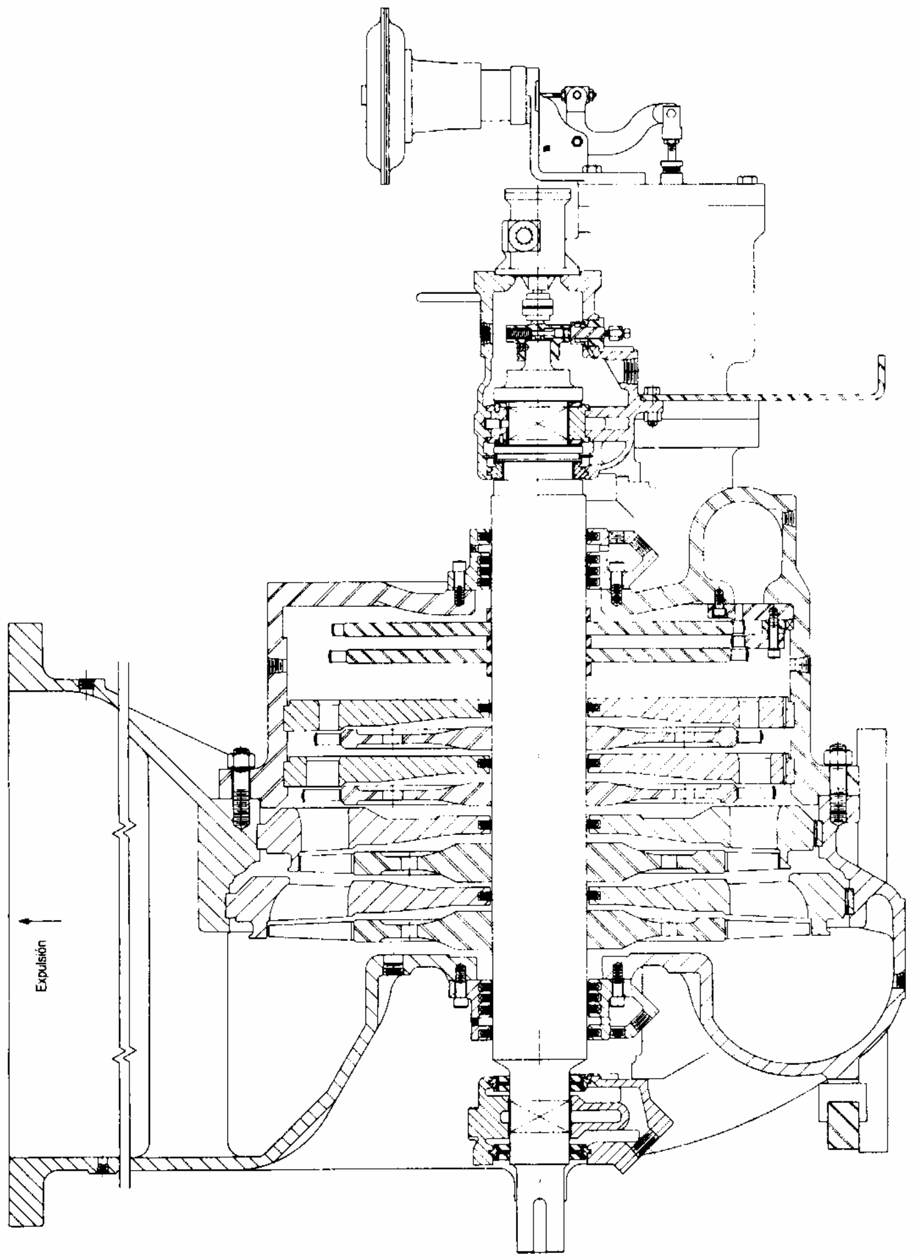


FIG. 24-14 Turbina de vapor de válvula sencilla y etapas múltiples. (*Elliot.*)

FIG. 24-15 Mecánic

a p_3 a través del pa
como un porcentaje
Debido al ángul
eficiente que la d
grar la misma caí
fuga, y la elecció
ción de apoyo.

La **etapa Curtis**
rias para absorber l
versión entre amba
con la velocidad de
serva todavía gran
de, agregando una
de hacerlo pasar de
tituye una práctica
etapa, cuando la ra
mayor. La etapa d
como la etapa de u
encuentran con la
la corriente.

RENDIMIENT

La energía dispon
velocidad de un fl
cando la expresió

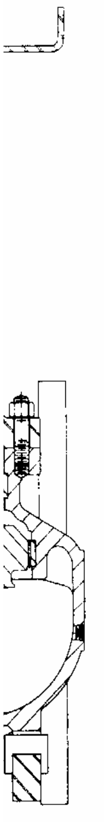


FIG. 24-14 Turbina de vapor de válvula sencilla y etapas múltiples. (*Elliot.*)

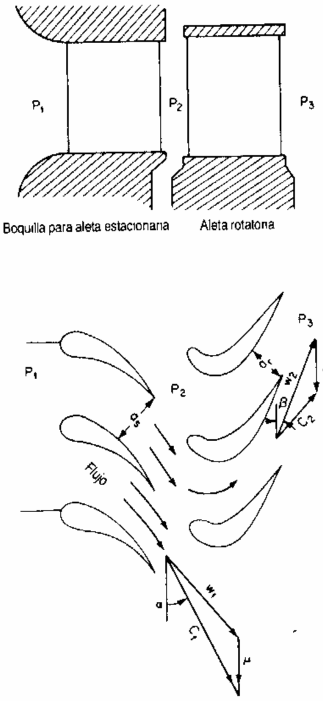


FIG. 24-15 Mecánica básica de una etapa de turbina.

a p_3 a través del paso de álabe. La reacción en una etapa se expresa como un porcentaje de la energía de etapa disponible.

Debido al ángulo del álabe menor, la etapa de reacción es más eficiente que la del impulso, pero requiere más etapas para lograr la misma caída de presión. Esto aumentará las pérdidas y la fuga, y la elección posible se acerca, casi siempre, a una condición de apoyo.

La **etapa Curtis** es de tipo de impulso que utiliza dos hileras rotatorias para absorber la energía en C_1, con una hilera estacionaria de inversión entre ambas. Esto sucede cuando C_1 es grande en comparación con la velocidad de rueda, de modo que la velocidad de salida C_2 conserva todavía gran cantidad de energía. Esta energía se disipa más tarde, agregando una hilera estacionaria para invertir el flujo, con el fin de hacerlo pasar después por una hilera rotatoria adicional. Esta constituye una práctica universal cuando se trata de turbinas de una sola etapa, cuando la razón p_1/p_3 se ubica dentro del intervalo de 2 a 2.5 o mayor. La etapa de impulso de dos hileras (Curtis) no es tan eficaz como la etapa de una sola hilera, debido a las pérdidas mayores que se encuentran con la velocidad de vapor elevada y los giros repetidos de la corriente.

RENDIMIENTO Y EFICIENCIA

La energía disponible en el vapor se expresa en Btu/lb, o entalpía. La velocidad de un flujo de vapor que pasa por la tobera se calcula aplicando la expresión:

$$C_1 = 223.7\sqrt{\Delta h} \qquad (24\text{-}14)$$

en donde C = velocidad, ft/s, y Δh es la caída de entalpia de p_1 a p_2, Btu/lb. Ésta es la misma fórmula que se utilizó para la velocidad de derramamiento de un líquido en términos de la carga, introduciendo el equivalente mecánico del calor.

Para fines de cálculo, la **eficiencia de las etapas individuales de la turbina** se presenta gráficamente como eficiencia μ en función de la razón de velocidad μ/C_1. En la figura 24-16 se ilustra la relación entre los tres tipos principales de etapas; cada uno de ellos tiene una eficiencia de pico a una razón específica de μ/C_1. Por supuesto, para el mismo valor de rpm, la etapa de dos hileras adopta el valor más alto de C_1 y la caída de entalpía más grande. La etapa de reacción adopta los valores más bajos. La etapa de impulso de una sola hilera (Rateau) se ubica hacia la mitad. La etapa de reacción se denota como el 70%, debido a que el 30% de la entalpía se asigna como margen para la expansión en la hilera estacionaria y el 70% para la hilera rotatoria.

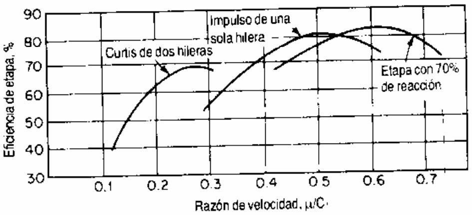


FIG. 24-16 Eficiencia de etapa para diferentes clases de etapas.

Cantidad de vapor Los datos de entalpía se obtienen en los diagramas de Mollier o en las tablas de vapor (véase la Sec. 3) y a partir de ellos se calcula la **cantidad teórica de vapor**. Por ejemplo, una condición de entrada de estrangulamiento equivalente a 4137 kN/m² (600 lb/in² manométrica) y 399°C (750°F) da una entalpía de 3.2 MJ/kg (1380 Btu/lb) y si el punto final se localiza a 348 kN/m² (50 lb/in² manométricas), entonces, la expansión adiabática se efectúa a 2.69 MJ/kg (1157 Btu/lb). Esto da las 0.52 MJ/kg (223 Btu/lb) disponibles y la cantidad teórica de vapor se calcula basándose en el equivalente de Btu por kilowatt-hora o caballo de potencia-hora:

$$3412.4/223 = 15.3 \text{ lb de vapor/kWh}$$
$$2544/223 = 11.4 \text{ lb de vapor/(hp} \cdot \text{h)}$$

Las tablas de las cantidades teóricas de vapor aparecen como publicaciones por separado y en la tabla 24-6 se dan algunas de las condiciones más comunes.

La **cantidad real de vapor** se deduce dividiendo la cantidad teórica de vapor entre la eficiencia de motor, lo cual incluye las pérdidas termodinámicas y mecánicas. Por otro lado, la eficiencia interna se puede utilizar también y las pérdidas mecánicas se aplican en una segunda etapa.

La eficiencia varía en una gama amplia, según la cantidad de etapas de la turbina. Suponiendo que las condiciones de vapor son 4.14 MN/m² (600 lb/in² manométricas) a 399°C (750°F) de entrada y 13.8 kN/m² (2 lb/in² absolutas), en la salida, la tabla 24-6 estipula una cantidad teórica de vapor de 3.47 kg/kWh (7.65 lb/kWh). Cuando hay eficiencias que se pueden experimentar para ciertas condiciones de vapor con turbinas de 1, 5, 7 y 9 etapas, las cantidades reales de vapor son las que se indican en la tabla 24-7.

En esta tabla se observa que la eficiencia aumenta con el número de etapas y que el número creciente de etapas corresponde a valores más grandes de caballaje. Para cada etapa, identificada por el diámetro y la velocidad, se tiene una caída de Btu que da la mejor eficiencia, a condición de que se tenga el suficiente vapor para llenar la etapa, de modo

TABLA 24-6 Cantidades teóricas de vapor para turbinas de vapor a ciertas condiciones comunes, lb/kWh

	Condiciones de entrada							
Presión de salida	150 lb/in² man, 366°F, saturados	200 lb/in² man, 388°F, saturados	250 lb/in² man, 500°F, 94°F, sobrecalentamiento	400 lb/in² man, 750°F, 302°F, sobrecalentamiento	600 lb/in² man, 750°F, 261°F, sobrecalentamiento	600 lb/in² man, 825°F, 336°F, sobrecalentamiento	850 lb/in² man, 825°F, 298°F, sobrecalentamiento	850 lb/in² man, 900°F, 373°F, sobrecalentamiento
2 in Hg	10.52	10.01	9.07	7.37	7.09	6.77	6.58	6.28
4 in Hg	11.76	11.12	10.00	7.99	7.65	7.28	7.06	6.73
0 lb/in², man	19.37	17.51	15.16	11.20	10.40	9.82	9.31	8.81
10 lb/in², man	23.96	21.09	17.90	12.72	11.64	10.96	10.29	9.71
30 lb/in², man	33.6	28.05	22.94	15.23	13.62	12.75	11.80	11.07
50 lb/in², man	46.0	36.0	28.20	17.57	15.36	14.31	1'3.07	12.21
60 lb/in², man	53.9	40.4	31.10	18.75	16.19	15.05	13.66	12.74
70 lb/in², man	63.5	45.6	34.1	19.96	17.00	15.79	14.22	13.25
75 lb/in², man	69.3	48.5	48.8	20.59	17.40	16.17	14.50	13.51

NOTA: Para convertir libras fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.8948×10^{-3}; para convertir libras por kilowatt hora en kilogramos por kilowatt hora, multiplíquese por 0.4536; °C = 5/9 (°F – 32).

que opere con un mínimo de pérdidas por fricción normal y fricción del aire. Por tanto, la turbina de nueve etapas es apropiada para 7.46 MW (10 000 hp), pero no daría muy buenos resultados como la turbina, de cinco etapas a 0.746 MW (1000 hp) debido a que las pérdidas aumentarían con el flujo ligero.

Según el diagrama de velocidad que aparece en la figura 24-15, es obvio que un incremento en la velocidad de rueda permite un aumento en la velocidad de salida de la boquilla C_1, sin que se eleve C_2. Asimismo, una turbina de alta velocidad contiene más Btu por etapa y tendrá menos etapas que una turbina de baja velocidad.

La velocidad de salida C_2 es una medida de la energía no utilizada. Para lograr mayor eficiencia, C_2 no debe tener ninguna componente radial y tendrá una naturaleza axial recta. Para todas las etapas, excepto la última, C_2 representa un acarreo a la siguiente etapa. En el caso de la última etapa, C_2 es la velocidad con que se entra a la cubierta de expulsión, y se define como la pérdida de salida o pérdida de expulsión.

Las curvas ilustradas en las figuras 24-17 y 24-18 se utilizan para calcular **cantidades de vapor de turbinas de una sola etapa** procediendo como se indica en el siguiente ejemplo: para condiciones de vapor equivalentes a 2.76 MN/m² (400 lb/in² manométricas), y 399°C (750°F) de entrada, y 5.17 N/m² (75 lb/in² manométricas) de salida, la tabla 24-6 especifica una cantidad teórica de vapor de 20.59 lb/kw-h. Si la turbina es de 300 hp y 4000 rpm, se principia en la parte superior de la figura 24-17 en 4000 y, para un alto de prueba, a 18 in de diámetro de base de los álabes de turbina, luego se desciende a la cantidad teórica de vapor (TSR) 20.59, de donde la cantidad de base del vapor es 37.0 lb/hp·h. A continuación se principia en la parte superior de la figura 24-18 a 4000 rpm y se hace un corte a 75 lb/in² manométricas para después descender a un diámetro de 18 in y encontrar una pérdida de 8 hp. Así, pues, el caballaje total es 308.5 y el vapor requerido es (308.5)(37.0) = 11 400 lb/h. Se puede preparar una tabla de selección, leyendo valores para otros diámetros, como se ilustra en la tabla 24-8.

La unidad más eficiente se elige basándose en esta tabla y se compara con el precio. Es evidente que, para 300 hp, el diámetro de 28 in no representa ninguna ganancia en relación con el diámetro de 22 in, debido al aumento en la pérdida de caballaje. En la comparación del diámetro de 22 in con el de 18, la ganancia es pequeña y puede quedar en desventaja debido al precio superior.

Las cantidades de vapor para turbinas de etapas múltiples dependen de muchas más variables que las turbinas de una sola etapa y necesitan un cálculo mucho más elaborado. Según el tipo de turbina, de una válvula o de válvulas múltiples, para fines generales o con transmisión de generador, de condensación o no condensación, con extracción o sin ella, los fabricantes ofrecen procedimientos abreviados para calcular el funcionamiento, datos que incluyen en los boletines que editan para todos los diferentes tipos producidos. La curva de la figura 24-19 se utiliza como aproximación general, teniendo en cuenta que una turbina real puede encontrarse a varios puntos por encima o por debajo de las curvas, según el empleo de la determinación óptima de etapas para una mayor eficiencia o llegando a un punto intermedio para justificar el precio. La velocidad tiene también una importancia primordial; la alta velocidad a 373 kW (500 hp) puede representar pérdidas elevadas, en tanto que 7.46 MW (10 000 hp) a 12 000 rpm puede quedar encima de la curva. Además, la presión de vapor afecta el buen rendimiento. La turbina más eficiente es aquella en que la velocidad, la presión y el flujo de vapor se combinan para llenar la trayectoria de álabe, de tal modo que no se tengan etapas de admisión parcial. Para una admisión parcial, las boquillas no llenan todo el arco de 360°, debido a que no se dispone de vapor suficiente para tantas boquillas. Las porciones de los álabes que giran fuera del arco de boquillas crean fricción normal y fricción de aire.

CONTROL DE TURBINA

Una turbina puede tener control de velocidad, presión o proceso. Algunos términos utilizados se definen como sigue:

Sistema regulador de la velocidad, que incluye el regulador y el cambiador de velocidad, el servomotor que activa las válvulas y las válvulas controladas por regulador.

El regulador de velocidad incluye sólo los elementos que responden directamente a la velocidad y la posición de otros elementos.

TABLA 24-7 Eficiencias de etapa para turbinas de vapor

Diseño de turbina	Hp de turbina	Eficiencia interna, %	Entalpía de salida, Btu/lb	Δh,* Btu/lb	Cantidad de vapor
Etapa sencilla	500	30	1245	135	7.65/0.30 = 25.5 lb/kW-hr.
5 etapas	1 000	55	1135	245	7.65/0.55 = 13.9 lb/kW-hr.
7 etapas	4 000	65	1090	290	7.65/0.65 = 11.75 lb/kW-hr.
9 etapas	10 000	75	1020	360	7.65/0.75 = 10.02 lb/kW-hr.

NOTA: Para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457; para convertir unidades térmicas británicas por libra en kilojoules por kilogramo, multiplíquese por 2.33.

*Basada en la entalpía de entrada = 1380 Btu/lb.

/h

man,	850 lb/in² man,
38°F.	900°F, 373°F.
enta-	sobrecalenta-
o	miento
3	6.28
5	6.73
1	8.81
9	9.71
)	11.07
7	12.21
6	12.74
2	13.25
0	13.51

'att hora en kilogramos

ueña y puede quedar

tapas múltiples de- i de una sola etapa y in el tipo de turbina, enerales o con trans- nsación, con extrac- ntos abreviados para en los boletines que La curva de la figura iendo en cuenta que os por encima o por minación óptima de unto intermedio para ma importancia pri- le representar pérdi- a 12 000 rpm puede vapor afecta el buen en que la velocidad, mar la trayectoria de misión parcial. Para el arco de 360°, de- tantas boquillas. Las boquillas crean fric-

esión o proceso. Al-

uye el regulador y el va las válvulas y las

ementos que respon- otros elementos.

dad de vapor

5.5 lb/kW-hr.
3.9 lb/kW-hr.
1.75 lb/kW-hr.
0.02 lb/kW-hr.

libra en kilojoules por

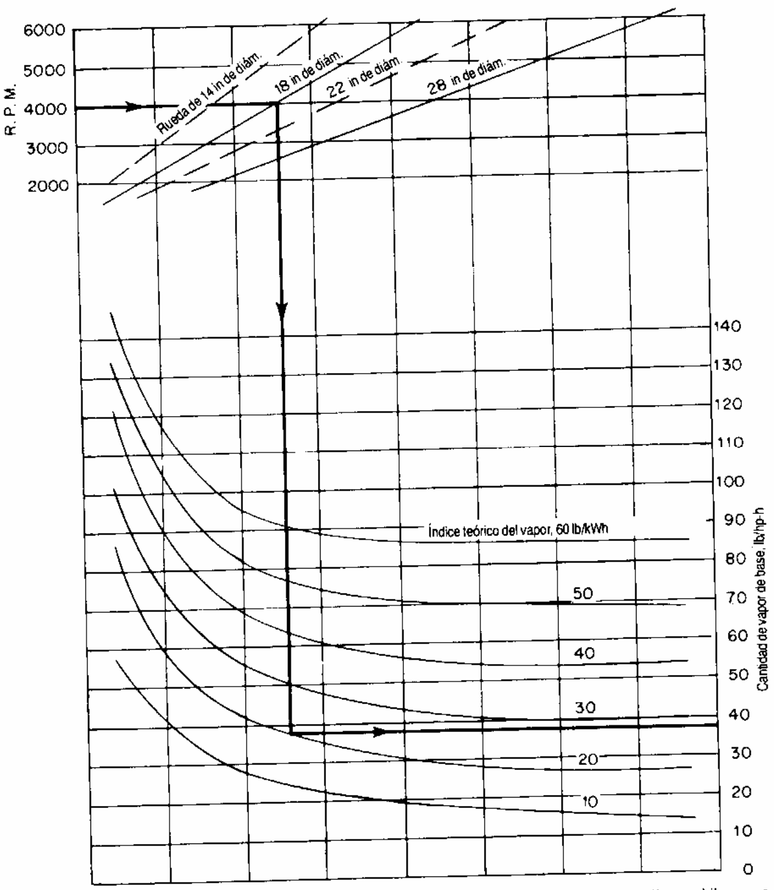


FIG. 24-17 Velocidad aproximada del vapor para turbinas de etapa sencilla. Para convertir libras por kilowatt/ hora en kilogramos por kilowatt/hora, multiplíquese por 0.4537; para convertir pulgadas en metros, multiplíquese por 0.0254; y para convertir libras por caballos de potencia-hora (hp-h) en kilogramos por kilowatt/hora, multiplíquese por 0.6084.

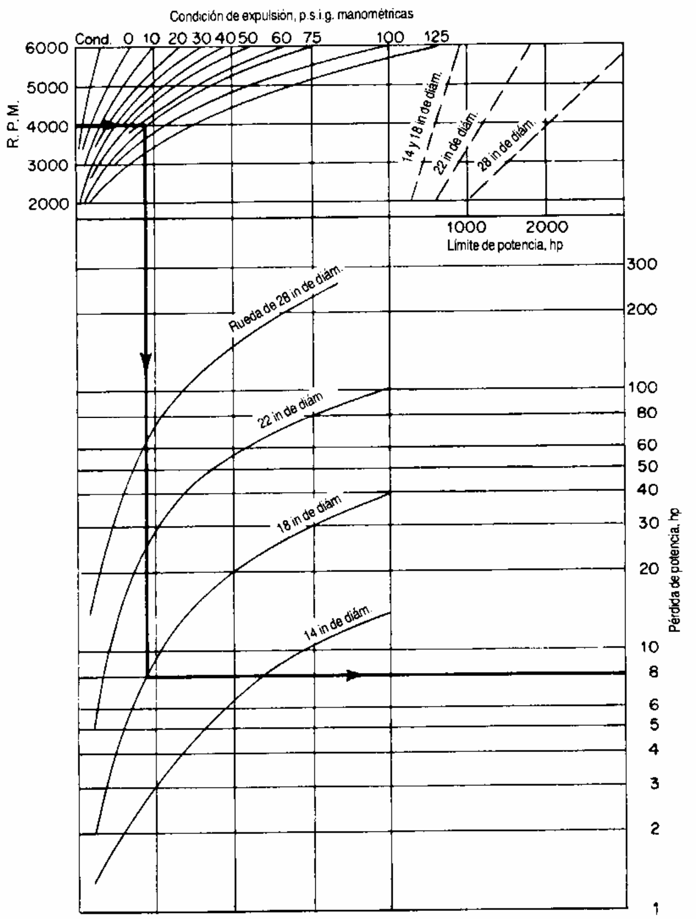


FIG. 24-18 Pérdida aproximada de potencia para turbinas de una sola etapa. Para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457; para convertir pulgadas en metros, multiplíquese por 0.0254; y para convertir libras por pulgada cuadrada manométrica en kilopascales, multiplíquese por 6.895.

TABLA 24-8 Tabl
vapor

Diámetro de rueda	Cantidad d vapor de basc, lb/hp
14	44.5
18	37.0
22	33.0
28	29.5

NOTA: Para converti kilowatt-hora, multipliq en kilowatts, multipliqu

El cambiador de v el punto de referencia

La regulación de la velocidad o la pres valor nominal), cuan mente, a partir del va

La variación de v ción con el punto de oscilación.

El regulador de a ción inherente y una de velocidad) y la sal ladora.

TABLA 24-8 Tabla usual de selección de turbina de vapor

Diámetro de rueda	Cantidad de vapor de basc, lb/hp-h	Pérdida de potencia, hp	Potencia total, hp	Vapor requerido, lb/h	Cantidad de vapor lb/hp-h
14	44.5	3.0	303	13 500	44.6
18	37.0	8.5	308.5	11 400	38.1
22	33.0	26.0	326.0	10 750	36.9
28	29.5	64.0	364.0	10 750	36.9

NOTA: Para convertir libras por caballos de potencia-hora en kilogramos por kilowatt-hora, multiplíquese por 0.6084; para convertir caballos de fuerza (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457.

El **cambiador de velocidad** es un dispositivo que permite cambiar el punto de referencia.

La **regulación de estado estacionario o uniforme** es el cambio en la velocidad o la presión sostenidas (expresadas como porcentaje del valor nominal), cuando la salida de potencia o flujo se reduce gradualmente, a partir del valor nominal hasta cero.

La **variación de velocidad** es el cambio total de velocidad en relación con el punto de referencia e incluye tanto la banda muerta como oscilación.

El **regulador de acción proporcional** es un dispositivo con regulación inherente y una relación lineal continua entre la entrada (cambio de velocidad) y la salida del elemento de control final, la válvula reguladora.

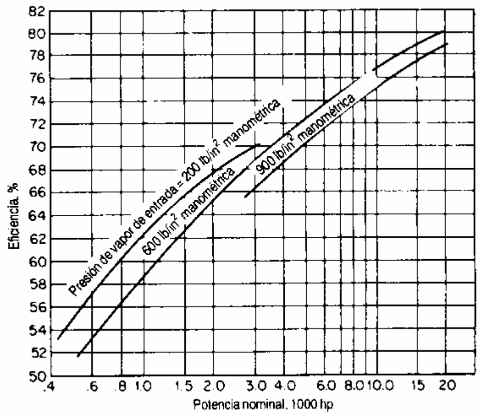


FIG. 24-19 Eficiencia aproximada para turbinas de varias etapas. Para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457.

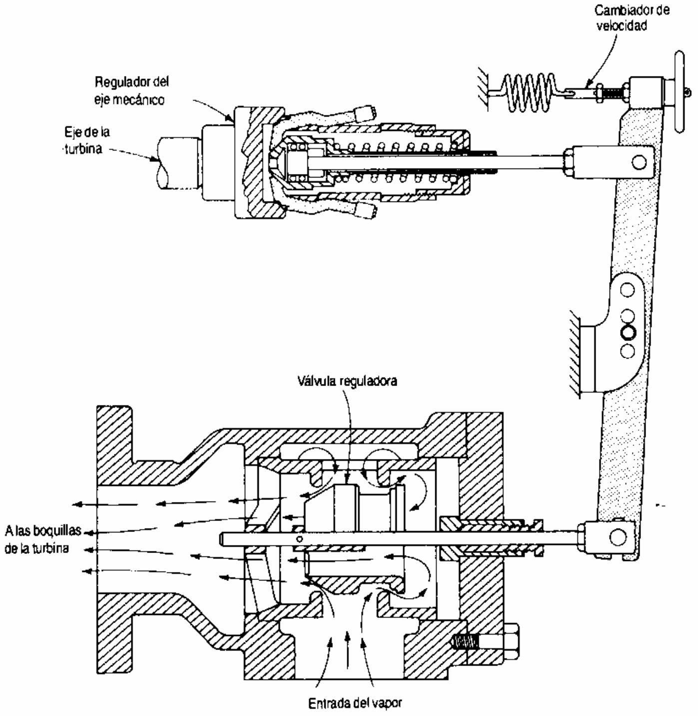


FIG. 24-20 Regulador centrífugo de acción directa.

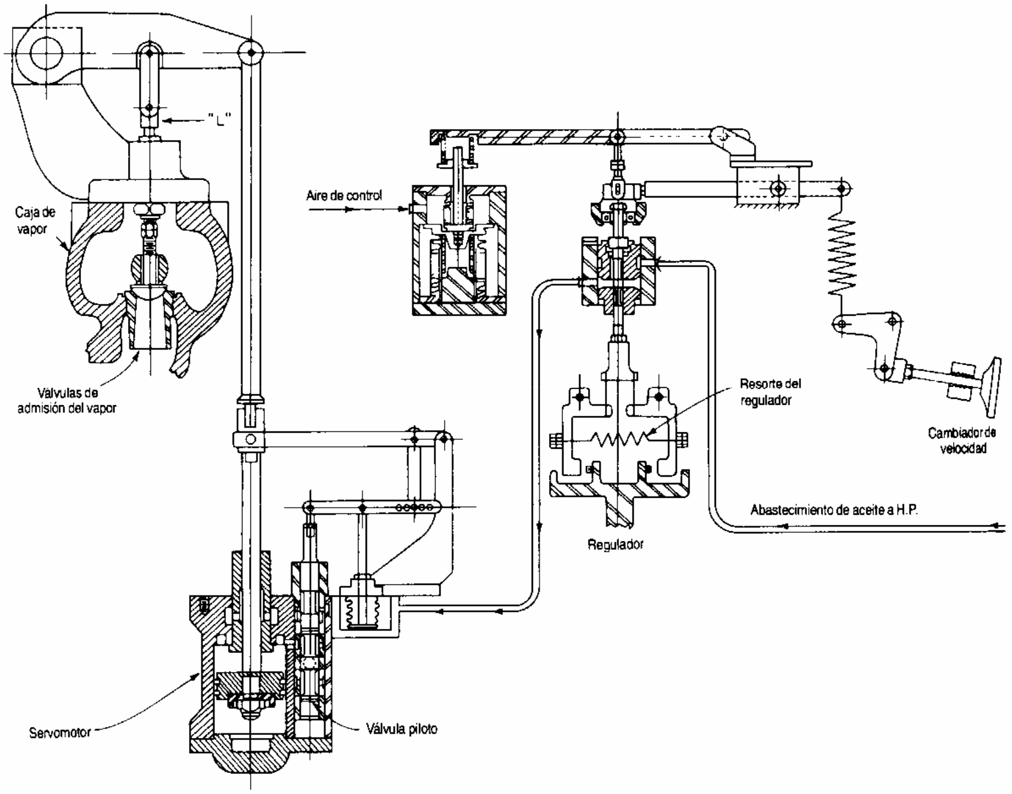


FIG. 24-21 Control hidráulico mecánico de velocidad de tipo proporcional.

Regulador de acción proporcional con restauración, que es un dispositivo con regulación inherente, de manera que la salida momentánea es proporcional al cambio de entrada y, posteriormente, una acción de restauración iniciada por la salida actúa en el conmutador de velocidad o su equivalente, para hacer que la regulación establecida sea menor que la inherente.

El **regulador isocrónico** es un dispositivo de acción de flotación que controla la velocidad constante. Está equipado con una cámara de aire o cámara de compensación para generar una regulación momentánea para un cambio de entrada de velocidad.

Componente de un sistema de control Los tres elementos principales de un sistema de control son el dispositivo sensor, que mide el error como la desviación registrada en relación con el punto de referencia, los medios adecuados para transmitir y amplificar la señal de error y el dispositivo de control de salida, en forma de una válvula servooperada. En el caso del **regulador centrífugo de acción directa** (Fig. 24-20), estos tres elementos se combinan en el elemento centrífugo y el enlace se conecta con la válvula.

La fuerza centrífuga de los pesos se compara continuamente con el punto de referencia, como establece el resorte del regulador, que se opone a la fuerza proveniente de los pesos del mismo. Para un incremento en la carga, la velocidad desciende y la fuerza del peso se reduce, lo cual permite que el resorte empuje el huso del regulador hacia la izquierda. Entonces, la palanca pivotea y la válvula se desplaza hacia la derecha y se abre para incrementar el flujo de vapor y el par de rotación. La retroalimentación en el control es el resultado de aumentar la velocidad para igualarla, una vez más, con el punto de referencia del resorte del regulador y eliminar, así, el error. Este regulador corresponde a una regulación de velocidad del 10% clase NEMA A; dicho de otra manera, un aumento del 10% en la velocidad de la condición de carga plena a ninguna carga y los pesos del regulador se deben mover para cerrar la válvula.

La fuerza necesaria para determinar la posición de la válvula y la regulación especificada impone un límite práctico al regulador de activación directa. Más allá de dicho límite, se requiere el empleo de un **servomecanismo**. Los requisitos de este último se refieren a tres niveles: el más bajo corresponde a una sola válvula del tipo balanceado, como el que se ilustra en la figura 24-20, el cual se puede controlar con menos de 889.6-N (200 lb) de fuerza. El siguiente nivel es una sola válvula con un solo asiento, de tipo venturi, que cuando está parcialmente balanceada, necesita de 3558.4-N a 4448-N (800 a 1000 lb de fuerza). El nivel superior es el levantador de barra de válvulas múltiples o el engrane de válvulas con un levantador de levas, en donde se necesitan servomecanismos lubricadores de 8 a 10 in y mayores, que se emplean para desarrollar varios miles de libras de fuerza.

Abaste

FIG. 24-22 Control

Sistemas de cont es mecánico, aunqu y, más recientement lizan todos ellos es u ción y ocasionalmen ras.

En las figuras 24 **hidráulicos** distint vapor de levantador trabajos pesados. El centrífuga conectad de presión de contr dola a un fuelle del

FIG. 24-23 Contro

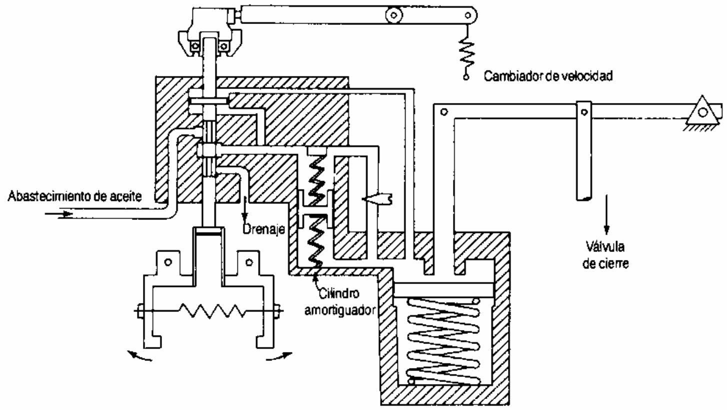


FIG. 24-22 Control hidráulico mecánico de velocidad, de tipo isocrónico.

Sistemas de control de velocidad El elemento sensor más común es mecánico, aunque algunos sistemas los emplean de tipo hidráulico y, más recientemente, electrónicos. El posicionador de válvula que utilizan todos ellos es un servomecanismo hidráulico como primera elección y ocasionalmente recurren a los neumáticos para cargas más ligeras.

En las figuras 24-21 y 24-22 se ilustran dos **sistemas mecánicos hidráulicos** distintos. En la figura 24-21 se presente una cámara de vapor de levantador de barra con un servomecanismo hidráulico para trabajos pesados. El elemento sensor de la velocidad es un montaje de centrífuga conectado a un piloto-rotatorio. Este último envía una señal de presión de control que es proporcional a la velocidad, comunicándola a un fuelle del servomecanismo. Un cambio en la presión de control iniciado a través del piloto rotatorio, ya sea por la velocidad o por un conmutador de velocidad genera una desviación en el fuelle y la válvula piloto del servomecanismo. La posición del servopistón es proporcional a la presión de control.

En la figura 24-22 se muestra un servomecanismo de retorno de resorte que se aplica en turbinas de una sola válvula, utilizando una fuerza de válvula moderada. Para un cambio de velocidad, el piloto rotatorio envía una señal de error por la cámara de aire hasta el servopistón. Se trata de un regulador isocrónico tipo cámara de aire; la señal de error origina una regulación instantánea, gracias a los resortes de la cámara de aire; pero una vez que la presión se ha igualado por medio de la válvula de aguja, ya no queda un cambio de fuerza resultante en el piloto del regulador. La presión de control no es proporcional a la velocidad, de modo

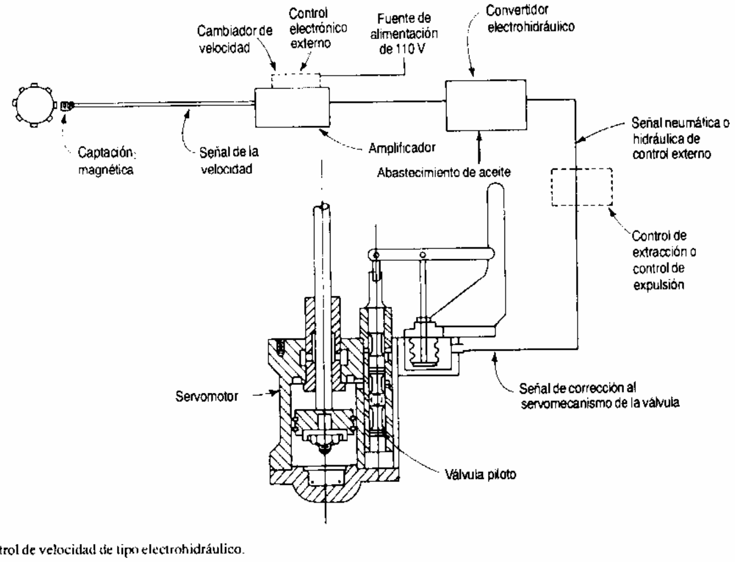


FIG. 24-23 Control de velocidad de tipo electrohidráulico.

que el regulador tiene una regulación cero que se denomina también control isocrónico. El ajuste de la válvula de aguja determina el tiempo que requiere el sistema para igualarse o equilibrarse después de una perturbación, lapso que puede durar varios segundos.

El **control de velocidad electrohidráulico** está obteniendo cada día mayor aceptación en turbogeneradores, debido a la precisión de control de velocidad que ofrece y a su adaptación sencilla al funcionamiento con computadoras y en controles remotos, como el arranque y la carga automática. Estas mismas características deben hacerlo apropiado para plantas de procesamiento, en las cuales las señales eléctricas están imponiéndose a las neumáticas. En la figura 24-23 se indican los elementos de control electrohidráulico. Cerca de una rueda dentada que va sobre el eje, se monta un captador. Conforme el diente pasa por éste, cada diente genera un pequeño pulso de fem. Estos pulsos constituyen una entrada digital al amplificador y este último desempeña tres funciones. La entrada digital se integra a un nivel de cc proporcional a la velocidad, se amplifica y el nivel de voltaje amplificado se compara con un circuito de punto de referencia. La corriente de salida diferencial se emplea para impulsar un convertidor electrohidráulico. El convertidor controla la válvula de piloto de una servocámara de vapor estándar. El convertidor ilustrado envía una presión de control proporcional a la corriente y ésta se aplica al fuelle. Hay otros tipos en que se aplica una corriente de salida más alta a un solenoide que sitúa el piloto del servomecanismo o una tubería de chorro que aplica un diferencial de presión en los extremos del piloto del servomecanismo, estableciendo la nueva posición con dicho diferencial.

El control remoto de velocidad o **el control de velocidad de proceso** adopta una de dos formas posibles. La señal remota puede ubicar la válvula directamente, actuando sobre el eje de la misma o en el piloto del servomecanismo. Esta acción es independiente del regulador. Para esta forma de operación, el regulador se ajusta a una velocidad máxima de operación, y toma el mando en una emergencia. Este tipo de operación se clasifica como de preurgencia. En el segundo tipo, la señal remota actúa en el conmutador de velocidad o su equivalente, para ajustar el punto de referencia. El regulador forma siempre parte del circuito en este caso y la unidad responde siempre a la velocidad.

El control de velocidad activa la válvula reguladora para mantener un flujo de vapor equivalente a la demanda de carga, mientras se conserva básicamente constante la velocidad. Ante cambios de carga repentinos, se tendrá una sobremodulación durante un breve lapso, y uno de los casos especiales es la pérdida instantánea de carga, es decir, la caída de carga a carga plena. La especificación acostumbrada establece que la sobremodulación ante una caída de carga no debe sobrepasar del 9 al 10% de la velocidad nominal. El aumento de velocidad establecido será, por supuesto, igual que la regulación, es decir, de 4 a 6% para un regulador de clase NEMA C o B, y menos del 1% para la clase D.

Se proporciona una **válvula de escape** como segunda línea de defensa, en caso de que registre una velocidad excesiva y el escape se ajuste en la gama de 10 a 15% por encima de la velocidad nominal. Esta válvula se equipa a menudo con un solenoide que dispara el escape, el cual se puede operar por medio de un botón de presión cuando se presente una baja presión de aceite o cualquier otro trastorno de proceso. Cuando el control de velocidad funciona como se describió antes, el escape se activará, debido a una caída de carga.

Control de presión de extracción En la figura 24-24 se presenta el diagrama esquemático de una turbina de extracción equipada con un regulador, de tal manera que la presión de extracción se controla en forma automática, y está equipada con dos conjuntos de válvulas de cámara de vapor. Cada uno de estos juegos de válvulas de cámara de vapor funciona mediante un servomotor. El flujo de estrangulamiento se ilustra como el total de dos corrientes: *A*, que recorre la longitud de la turbina y sale por la abertura de expulsión y *B*, que sale por el conducto de extracción. La salida del eje se suma a la potencia generada por las dos corrientes. Si la demanda del proceso aumenta, el flujo *B* se incrementa y desarrolla más potencia. Para una salida constante, el flujo *A* se debe reducir y esa es la función del enlace de tres brazos: abrir las válvulas reguladores y cerrar las de extracción, que hacen que aumente el flujo de estrangulamiento $(A + B)$ y disminuya el flujo *A* del condensador para un flujo de extracción mayor a carga constante. Para una reducción, se sigue esta secuencia en sentido inverso.

Para un incremento o una reducción en la carga, el regulador mueve el enlace de tres brazos a una posición paralela y hace que las dos válvulas se desplacen en la misma dirección.

Este principio de la palanca de tres brazos es el mismo que el llamado control de extracción compensado. Se aplica a turbinas mecánicas, hidráulicas o eléctricas, para producir un movimiento de válvula opuesto, con el fin de generar cambios en la demanda de vapor y un movimiento de válvula paralelo para generar cambios en la carga.

La razón de la palanca de tres brazos depende de la razón del flujo de extracción cero al de extracción total para una carga determinada.

SELECCIÓN DE UNA TURBINA

Las **principales variables** que afectan la selección de la turbina son:

1. Potencia y velocidad de la máquina movida
2. Temperatura y presión de vapor disponible o que se va a decidir
3. Vapor necesario para el proceso, de manera que se pueda tomar en cuenta una turbina de contrapresión
4. Costo del vapor y valor de la eficiencia de la turbina para someter a consideración las secciones de etapas y válvulas
5. Empleo de engranajes para reducir o incrementar la velocidad

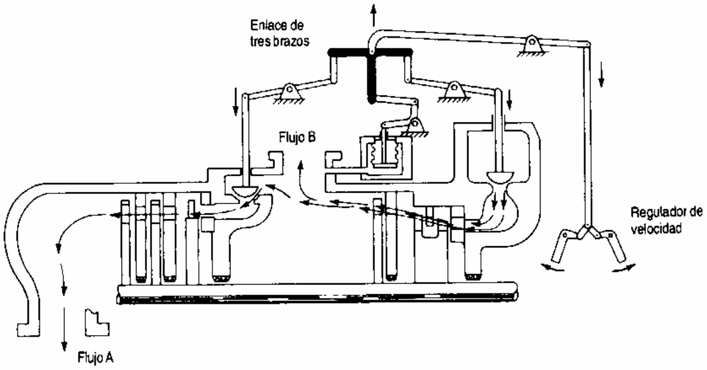


FIG. 24-24 Mecanismo para un control de presión con turbina de extracción.

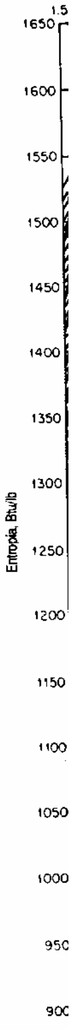


FIG. 24-25 Diagr
IEEE para una turbi
libra en kilojoules po
des térmicas británi
multiplíquese por 4.
megapascales, multi

segunda línea de de-
cesiva y el escape se
ocidad nominal. Esta
: dispara el escape, el
resión cuando se pre-
trastorno de proceso.
se describió antes, el

a 24-24 se presenta el
ción equipada con un
acción se controla en
juntos de válvulas de
álvulas de cámara de
de estrangulamiento
recorre la longitud de
l, que sale por el con-
la potencia generada
aumenta, el flujo *B* se
a salida constante, el
enlace de tres brazos:
acción, que hacen que
sminuya el flujo *A* del
carga constante. Para
o inverso.
a, el regulador mueve
hace que las dos vál-

l mismo que el llama-
a turbinas mecánicas,
ovimiento de válvula
manda de vapor y un
mbios en la carga.
e de la razón del flujo
a carga determinada.

ión de la turbina son:
la
e o que se va a decidir
ra que se pueda tomar

a turbina para someter
as
mentar la velocidad

r de
l

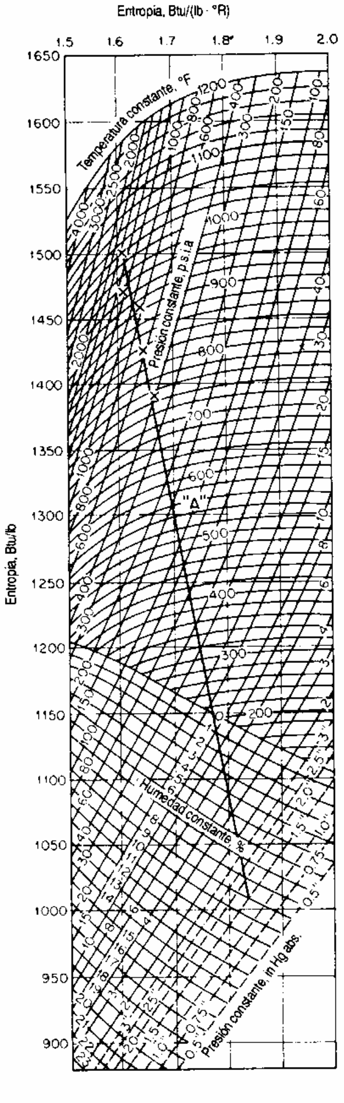


FIG. 24-25 Diagrama de Mollier que ilustra los valores estándares ASME-IEEE para una turbina de vapor. Para convertir unidades térmicas británicas por libra en kilojoules por kilogramo, multiplíquese por 2.328; para convertir unidades térmicas británicas por libra-grados, Rankine en joules por gramo-kelvin, multiplíquese por 4.19; y para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.895⁻³.

6. Extracción para el calentamiento del agua de alimentación
7. Turbina de condensación con extracción para proceso
8. Sistema de control, control de velocidad, control de presión, control de proceso, de manera que se pueda considerar el control remotor de tipo neumático o eléctrico y se puedan tolerar variaciones de velocidad o presión y la velocidad de respuesta del sistema
9. Características de seguridad, como escape para velocidades excesivas para descensos de lubricación, escape remoto de solenoide, controlador de vibración y otros controles especiales de temperatura, alteraciones de temperatura y cubierta y expansión de rotor
10. Lista de precios desde el mínimo correspondiente a una turbina de una sola etapa hasta las más eficientes de etapas múltiples

El **paso inicial para hacer la selección** sería, lógicamente, efectuar una estimación del flujo de vapor a varias presiones de vapor, utilizando la figura 24-19, para lograr una estimación aproximada de la eficiencia. Por desgracia, no se cuenta con normas rígidas para la temperatura y la presión de vapor, como se tienen, por ejemplo, en las etapas fijas de voltajes eléctricos, y muchos ingenieros se limitan a elegir una presión y una temperatura que les parece adecuada. Sin embargo, en general, los fabricantes prefieren trabajar con estándares propuestos hace algunos años por un comité conjunto de la ASME y la IEEE. Los valores son: presión manométrica de 2.76 MN/m² (400 lb/in²) y 399°C (750°F); presión manométrica de 4.14 MN/m² (600 lb/in²) y 441°C (825°F); presión manométrica de 5.86 MN/m² (850 lb/in²) y 482°C (900°F); presión manométrica de 8.62 MN/m² (1250 lb/in²) y 510 o 538°C (950 o 1000°F). En la figura 24-25, estos valores quedan en la línea *A*. Para una presión absoluta de salida de 1.5 in Hg, la línea *A* corresponde a una humedad del 9%. Cuando se opera a la izquierda de esta línea de estado (78 a 80% de eficiencia), la humedad de la última etapa aumenta con gran rapidez, lo cual significa una mayor erosión, a menos que se tenga una cantidad menor de calor. Desplazándose hacia la derecha de esta recta, las líneas de temperatura se hacen bastante planas, la presión desciende a temperatura constante y el calor disponible disminuye. Se debe observar que 538°C (1000°F) constituye un límite superior adecuado para turbinas de vapor, sin que se registre un incremento brusco en el costo debido al uso de materiales especiales. La experiencia ha demostrado que los costos de mantenimiento y los iniciales sobrepasan la ganancia en buen funcionamiento, cuando las temperaturas sobrepasan el intervalo de 538 a 566°C (1000 a 1050°F).

Ejemplo 1 Si una turbina va a funcionar con una exclusión a un vacío de condensador que dará 3 in Hg absoluta en el verano y 1 in Hg absoluta en el invierno, ¿qué vacío se debe especificar?

La turbina para tres in de Hg tendrá álabes de salida más cortos y un conducto de expulsión más pequeño y perderá 16 Btu/lb cuando funcione a 1 in de Hg. También tendrá una caída de presión elevada en los álabes de la última etapa. Se tendrá una emanación de velocidad sónica y ondas de choque de los álabes de la última etapa, induciendo una carga de álabes y oscilaciones que pueden causar fallas por fatiga. Para el funcionamiento a 1 in Hg la última etapa debe operar con un difusor que limitará la zona anular de descarga de dicha etapa.

Una turbina diseñada para 1 in Hg tendrá una gran fricción de aire en la última etapa, debido a que la región anular de las álabes no se puede llenar con vapor de mayor densidad.

La mejor respuesta es una salida diseñada para 2 in de Hg equipada con un difusor de álabes de expulsión. Esto la protegerá a una in de Hg y generará cierta recuperación de presión a 3 in de Hg en virtud de su acción de venturi.

Cuando se elige una **Turbina de extracción y condensación** se puede especificar de tres maneras, según la demanda de vapor de proceso y potencia. En relación con la figura 24-26, la adquisición habitual es una unidad en la cual la capacidad nominal se puede aplicar ya sea a una condensación directa o a una extracción total. La línea de extracción cero termina en *A* y la extracción total concluye en *B*.

Si la demanda de vapor de proceso es elevada y constante, entonces el tamaño de la salida de expulsión se puede reducir, ya que no se necesita gran capacidad de condensación. La opción sería ahorrar costos mediante una expulsión más pequeña que terminara en la línea de ex-

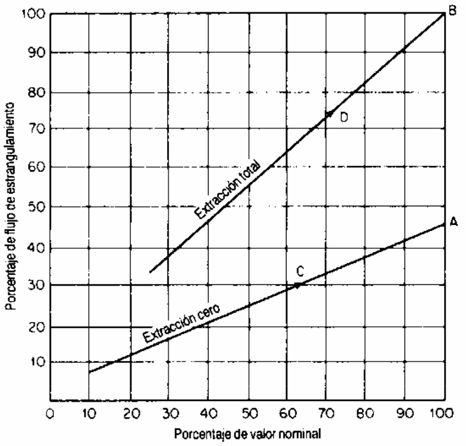


FIG. 24-26 Características de las turbinas de vapor de extracción-condensación.

tracción cero en el punto *C*, en tanto que la línea de extracción se extendería hasta *B* para la capacidad nominal.

Si la demanda del proceso es ligera y no se requiere un flujo de extracción elevado, entonces, casi toda la potencia se derivará del flujo de condensación. La otra elección posible sería tener un ahorro en los costos por medio de una entrada más pequeña y una cámara de vapor que haría que la línea de extracción total terminara en *D* y la línea de extracción cero lo hiciera en *A*

PRUEBAS Y RENDIMIENTO MECÁNICO

Cuando se realizan verificaciones para establecer **el funcionamiento o el rendimiento termodinámico** de una turbina de vapor, se debe seguir tan fielmente como sea posible, el Código de Verificación de Funcionamiento 6 de la ASME. El efecto de las desviaciones de este procedimiento ya establecido se debe evaluar con sumo cuidado. La medición del flujo es particularmente importante y el Código de Verificación de Funcionamiento 19 especifica los detalles correspondientes a las boquillas y los orificios de flujo. Las necesidades de la verificación se deben estudiar con extrema minuciosidad cuando la tubería tiene por objeto asegurar una verificación significativa.

El **funcionamiento mecánico** se comprueba, por lo común, corriendo pruebas en la fábrica, antes de enviar el equipo, y nuevamente una vez que se instala en su destino. En seguida se enumeran los conceptos que pueden proporcionar un funcionamiento suave y carente de vibraciones. El rotor debe tener un equilibrio dinámico y el balanceo con velocidad es el más eficaz. Los cojinetes deben estar en línea y es preciso corregir el margen del sello. Esta alineación se debe mantener tanto en frío como en caliente y durante las transiciones de frío a caliente. Las perturbaciones de la alineación pueden originarse en una expansión calorífica desigual de los soportes, por la expansión de la tubería o debido a las uniones y a la falta de libertad de expansión. La expansión de tubería es excesiva y las fuerzas demasiado grandes impuestas a la turbina han provocado muchos problemas de vibración. Los acoplamientos flexibles que no se flexionan provocan también problemas. Esto puede generar un cierre del par de fuerza o la descarga de los cojinetes y es posible que los cojinetes del impulsor y la máquina impulsada se desplacen, de tal modo que queden desalineados. Además, está el problema de la resonancia y la velocidad crítica. Los cimientos intervienen en esto y las columnas demasiado delgadas pueden contribuir a los problemas de resonancia. Si se tiene un engranaje en la alinación, se debe verificar con gran rigor en lo que respecta a la carga de cojinetes, alineación y frecuencia de resonancia que pueden ser múltiplos de la razón del engranaje. Asimismo, el abastecimiento de aceite para los cojinetes debe ser adecuado.

Esto es una prueba palpable de que la **vibracion** es la manifestación universal de que algo está mal. Por lo tanto, muchas unidades están equipadas con instrumentos que detectan continuamente la vibración. En años recientes, se han puesto en el mercado muchos instrumentos nuevos para analizar las vibraciones. La frecuencia se determina con precisión y se compara con cálculos ya establecidos y, mediante osciloscopios, es factible analizar la forma de onda y sus componentes armónicos. Este tipo de equipo constituye una ayuda enorme para diagnosticar la fuente del problema.

PROBLEMAS DE OPERACIÓN

Mientras que casi todas las turbinas tienen un registro de disponibilidad de 10 años en el intervalo del 95 al 99%, los problemas se pueden presentar en cualquier lugar; los más comunes son: vibraciones, variaciones cíclicas en el regulador, vástagos de válvulas que se pegan, empaques con fugas, arcos de temperatura, erosión en los álabes, pérdidas de potencia y problemas en los cojinetes.

Las causas de la **vibración** ya se vieron. Cualquier aumento en la vibración en un periodo se debe, casi siempre, a la pérdida de alineación, al asentamiento de los cimientos o a la adherencia de alguna característica de expansión, por ejemplo, una tubería o un pedestal. Otras causas son desgastes en los dientes de acoplamiento flexible, frotación interna de la unidad, pérdida del aceite de los cojinetes y desgastes de estos mismos. (La vibración durante el arranque se analiza bajo el arco de temperaturas.)

Si un **regulador** comienza a sufrir **variaciones cíclicas** después de funcionar durante cierto tiempo se considerará que se debe a que se genera una banda muerta o adhesión. Asimismo, todas las válvulas piloto se deben inspeccionar en busca de los efectos que produce el polvo en el aceite.

Los **vástagos de válvula pegados** es un fenómeno común que se presenta cuando hay sólidos en el vapor. El vapor debe estar completamente libre de ellos (Consúltense las observaciones propuestas en "Pérdida de potencia"). Es importante que las unidades que operan con una carga uniforme o estacionaria durante largos periodos se verifiquen a intervalos regulares, para comprobar que los vástagos no se peguen. Hay ciertos casos registrados en los cuales los depósitos han hecho que tanto el vástago de la válvula reguladora como el de la de escape se peguen cuando se registra una pérdida de carga. El efecto de esta pérdida fue un exceso de velocidad destructivo.

El desgaste y las fugas crecientes de los **empaques** es común. Los anillos de carbono se deben reemplazar después de uno o dos años de operación. Es probable que una unidad con empaque de laberinto o espiraloideo no necesite jamas reemplazarse; esto dependerá del funcionamiento. Si una unidad se pone en funcionamiento con suma rapidez, con un arco de temperatura en el eje, se generará cierto grado de frotación en el laberinto y todos los empaques deberán sustituirse.

Es importante entender las razones por las que se produce un **arco de temperatura**. Cuando una turbina se detiene y comienza a enfriarse, la mitad inferior, sobre todo en una unidad de condensación, se enfriará con mayor rapidez que la mitad superior. Una vez que el rotor deja de girar, la diferencia de temperatura aumenta y en 20 minutos se tendrá una diferencia de 28 a 83°C (50 a 150°F) entre la base y la parte superior. Tanto la carcasa como el eje describen un arqueo en el plano vertical debido a esta diferencia de temperatura. Si en esos momentos se abre el estrangulador y el eje curvado comienza a girar dentro de la carcasa, también curva, el empaque se desgastará después de unas cuantas revoluciones y a 200 rpm y más se detectarán golpes fuertes.

se tiene un engranaje
:n lo que respecta a la
sonancia que pueden
no, el abastecimiento

n es la manifestación
uchas unidades están
uamente la vibración.
muchos instrumentos
icia se determina con
dos y, mediante osci-
sus componentes ar-
da enorme para diag-

gistro de disponibili-
problemas se pueden
n: vibraciones, varia-
las que se pegan, em-
n los álabes, pérdidas

lquier aumento en la
la pérdida de alinea-
erencia de alguna ca-
a o un pedestal. Otras
ato flexible, frotación
jinetes y desgastes de
se analiza bajo el arco

s cíclicas después de
que se debe a que se
o, todas las válvulas
ectos que produce el

meno común que se
r debe estar comple-
ciones propuestas en
dades que operan con
s periodos se verifi-
e los vástagos no se
les los depósitos han
ora como el de la de
de carga. El efecto de
ivo.

ques es común. Los
de uno o dos años de
paque de laberinto o
esto dependerá del
onamiento con suma
generará cierto gra-
ques deberán susti-

e se produce un **arco**
y comienza a enfriar-
de condensación, se
. Una vez que el rotor
ta y en 20 minutos se
ntre la base y la parte
un arqueo en el plano
Si en esos momentos
a a girar dentro de la
ará después de unas
tarán golpes fuertes.

La fricción del empaque sirve para aumentar el arqueo por temperatura, calentando el lado alto del eje.

Otras causas del arco de temperatura son las válvulas con fugas y cuerpos dañados. Si el vapor se escapa hacia el interior de una turbina detenida, desde una válvula de escape o una válvula de detención con fugas, la mitad superior tendrá una temperatura más alta que la mitad inferior, de manera que formará el arco. Si el cuerpo del eje no tiene un contacto uniforme, se registrará una diferencia transitoria en la transmisión de calor al mismo y se generará nuevamente un arco. Asimismo, el arco se puede producir si se hace circular vapor sellado antes de que comience a girar el eje.

Las válvulas con fugas generan también **erosión**. La mayor parte de los problemas de erosión y corrosión en las turbinas se deben a los daños registrados cuando la unidad no está funcionando. Una fuga ligera de vapor hacia el interior de la turbina hace que el vapor se condense dentro de la misma y que la sal del agua de caldera se sedimente en las superficies interiores, provocando picaduras, incluso en los álabes de acero inoxidable. En ese espacio se deben tener dos válvulas con drenaje, es decir, una de bloqueo en el cabezal y otra de drenaje abierto en la línea, antes de llegar a la válvula de estrangulación de escape cerrada.

En una turbina que esté funcionando, la erosión y la corrosión se limitan casi siempre, a unidades que operan con vapor saturado y con un tratamiento inadecuado del agua de la caldera. Esta clase de erosión se desarrolla detrás del anillo de la boquilla y en torno a los diagramas, en el punto en que se adaptan a la cubierta.

La **pérdida de potencia** es otro concepto que se asocia generalmente al tratamiento del agua. En el caso de las sales disueltas en el vapor, éstas se quedan en solución cuando el vapor se somete a un sobrecalentamiento. Después de que el vapor se ha expandido a través de varias etapas y se ha saturado, las sales se separan con la humedad de la condensación. Los depósitos de sílice y otras sales se desarrollan en los álabes y las boquillas. Las presiones de etapa aumentan y las cargas disminuyen. La carga de empuje se incrementa y el cojinete de empuje tiende a fallar. Según la naturaleza de las sales, es posible que la corrosión se relacione con los depósitos o sólo en las regiones en donde el vapor pasa de sobrecalentado a simple vapor con humedad.

Los **cojinetes de turbina** manifiestan pocos signos de desgaste mientras se les mantenga con una película de aceite o un lubricante adecuado. La limpieza de los cojinetes se rastrea, casi siempre, al polvo localizado en el aceite o a un bloqueo en el abastecimiento del lubricante. Por lo tanto, la filtración debe ser adecuada y retener las partículas que puedan sobrepasar el espesor de la película de aceite. Las rajaduras producidas en el recubrimiento de metal antifriccionante es un fenómeno que se observa en algunas ocasiones y puede tener dos orígenes. El eje transmite gran cantidad de calor de las piezas de vapor hasta el muñón y el flujo de aceite dentro del cojinete debe ser suficiente para lubricar y eliminar este calor. De otra manera, el calor se transmite al recubrimiento de metal antifriccionante y éste se suavizará o reventará. Estas rajaduras se producen cuando el flujo de aceite se detiene demasiado pronto cuando la unidad se apaga. El segundo origen del resquebrajamiento de la superficie del cojinete son los golpes del muñón provocados por el arqueo del eje o los remolinos de aceite.

TURBINAS DE COMBUSTIÓN DE GAS

Las turbinas de gas se clasifican, casi siempre, según la salida de potencia a nivel del mar y a un aire ambiente a 26.7°C (80°F) [algunos diseños europeos se clasifican a 15.7°C (60°F)] y cuando queman un combustible específico. La salida de potencia y la eficiencia serán mayores para los combustibles que generan mayores volúmenes de productos de combustión, ya que el compresor no realiza ningún trabajo sobre el volumen adicional. Las turbinas de gas se clasifican posteriormente de acuerdo con sus configuraciones físicas y las piezas componentes como **1)** un solo eje, **2)** dos ejes, **3)** si son de tipo regenerativo (se utiliza un intercambiador de calor para recuperar las pérdidas de salida y calentar el aire que se comunica a las cámaras de combustión), **4)** si tienen interenfriamiento (cuando el calor se elimina entre los compresores), y **5)** si tienen recalentamiento (cuando se agrega calor entre las turbinas). Por lo consiguiente, la instalación puede ser de dos ejes, con una turbina de 7.46-MW (10000 hp), que cuenta con un interenfriador, un calentador y un regenerador (véanse las Figs. 24-27 y 24-28).

Eficiencia La **eficiencia global** de una turbina de gas es una función de las eficiencias del compresor y la turbina, la temperatura del aire ambiente, la temperatura de entrada de la boquilla y el tipo de ciclo utilizado (es decir, recalentamiento, etc.). El compresor y la turbina se diseñan para una eficiencia elevada y la temperatura del gas de la primera etapa establece las condiciones de material y el esfuerzo del primer conjunto de álabes rotatorios. A la temperatura del gas que se tiene en tales álabes, se agrega la caída de temperatura registrada en las boquillas de la primera etapa, para determinar la temperatura de entrada de la turbina que puede variar de 704 a 816°C (1300 a 1500°F) en el caso de turbinas de gas de tipo industrial y en niveles más altos para turbinas de gas que se utilizan en la aviación. Los valores superiores se emplean, casi siempre, en turbinas de impulso.

En una turbina de ciclo sencillo hay, por cada temperatura de entrada de turbina, una **razón de presión** óptima que genera la eficiencia más alta posible. La eficiencia y la razón óptima de presión aumentan con el incremento de las temperaturas de entrada de turbina. Estas relacio-

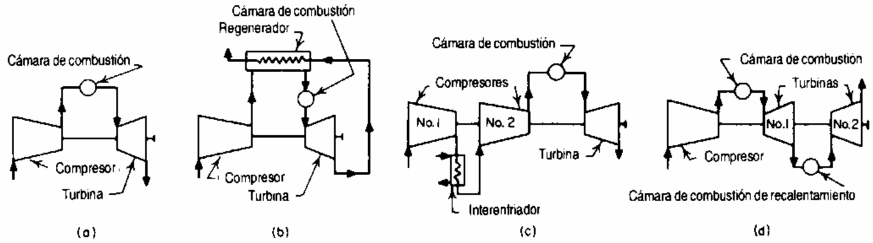


FIG. 24-27 Ciclos de una turbina de gas. *a*) Ciclos Básicos de Brayton o Joule. *b*) Turbina de gas con regeneración. *c*) Turbina de gas con interenfriamiento. *d*) Turbina de gas con recalentamiento. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

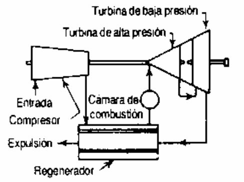


FIG. 24-28 Turbina de gas con ciclo regenerativo; configuración de dos ejes con turbinas de potencia separadas, en serie. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

nes de presión varían de 4 a 704°C (1300°F) hasta 6 para temperaturas de entrada a la turbina de 816°C (1500°F).

Los ciclos regenerativos favorecen razones de presión menores que dan como resultado temperaturas de descarga del compresor reducidas, con lo cual se permite una mayor recuperación de calor de los gases de combustión de la turbina. Las plantas regenerativas de razones elevadas utilizan interenfriadores en el circuito del compresor, para reducir la temperatura del aire de descarga del mismo.

Se puede utilizar cualquier tipo de compresor eficiente, por ejemplo, de desplazamiento positivo (Lysholm), centrífugo y de flujo axial; sin embargo, en la mayor parte de las turbinas de gas de tipo industrial se emplean compresores de flujo axial. La turbina puede tener álabes de impulso o reacción y minimiza las pérdidas, el aire proveniente de los flujos de descarga del compresor a través de la cámara de combustión y, directamente a la boquilla de la turbina. Las válvulas de estrangulador no se emplean debido a que la caída de presión resultante reduce la eficiencia total.

Una turbina de gas tiene gran cantidad de exceso de aire y la cámara de combustión está diseñada con una porción interna que quema sólo parte del aire para lograr altas temperaturas de combustión y valores altos de eficiencia. Los productos de combustión se mezclan eficazmente con el resto del aire para minimizar la estratificación de la temperatura. Cada turbina puede tener una cámara de combustión de gran tamaño y varias cámaras más pequeñas que funcionan en paralelo.

Opciones de diseño La mayor parte de las instalaciones de turbinas de gas son de **ciclo abierto**, que utilizan aire atmosférico como medio de trabajo y queman combustibles relativamente limpios. En el caso de combustibles "sucios" se ha sugerido que el quemador se ubique dentro de la descarga de la turbina de gas, utilizando un intercambiador calorífico para calentar el aire descargado por el compresor.

En las plantas de **ciclo cerrado** (véanse las Figs. 24-29 y 24-30), quizá se considere conveniente emplear otros gases, ya que la eficiencia de la planta aumenta conforme disminuye la razón del calor específico (c_p/c_v). La eficiencia óptima de planta se presenta a razones de presión cada vez más altas, con valores decrecientes c_p/c_v. No obstante, la mayor parte de los sistemas cerrados emplean aire por conveniencia. Los sistemas cerrados proporcionan una eficiencia de planta superior en una potencia que va de 25 al 100%, haciendo variar la salida de la turbina y la presión de entrada del compresor, del nivel atmosférico a una presión manométrica de 414 kN/m^2 (60 lb/in^2). Estas plantas requieren calentadores costosos que se deben colocar entre la descarga del compresor y la entrada de la turbina, así como enfriadores de gran tamaño, localizados entre la salida de la turbina y la succión del compresor. Por lo común, la quema de un combustible representa una fuente calorífica y el agua de enfriamiento es el medio para reducir la temperatura.

Con una sobrecarga sustancial, incluso si sólo es temporal, el resultado es que la turbina de gas de un solo eje se detiene, ya que la entrada del combustible queda limitada por el sistema de protección para temperaturas excesivas en la entrada. Si los requisitos de esfuerzo de rotación de la máquina impulsada no disminuyen lo suficiente con la reducción de la velocidad, entonces la turbina de gas seguirá perdiendo velocidad, dando como resultado temperaturas de salida más elevadas.

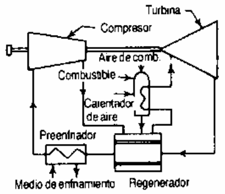


FIG. 24-29 Turbina de gas de ciclo cerrado. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

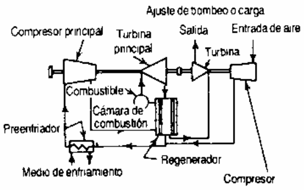


FIG. 24-30 Ciclo semicerrado de una turbina de gas de ignición interna. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

El sistema de protección contra temperaturas elevadas en la salida cerrará la válvula de combustible o reducirá más aún la entrada de éste, haciendo que la turbina pierda todavía más velocidad y se detenga finalmente. Para evitar esta situación, las características de carga del equipo impulsado se deben adaptar a las del propulsor.

La popularidad de las **turbinas de gas de un solo eje** se debe a su costo bajo y a lo compacto de su presentación, en lo que se refiere a la salida de potencia por pie cúbico de espacio de maquinaria (véase la Fig. 24-31). Su desventaja es que su gama de velocidad de funcionamiento es relativamente baja y que tiene una gran sensibilidad a las temperaturas atmosféricas. La gama de baja velocidad de funcionamiento se debe a los siguientes factores: **1)** la cantidad del flujo de aire inducido por el compresor es proporcional a su velocidad, y **2)** la contrapresión generada por las boquillas de la turbina es proporcional al flujo de aire. Con velocidades reducidas, la potencia de turbina desciende debido a los flujos de aire disminuidos y, en parte, por el efecto de las presiones bajas en las temperaturas permisibles para el aire de entrada. Cuando se tienen flujos reducidos, la presión restringida en la salida de la turbina puede requerir una disminución en la temperatura de entrada de la misma, con el fin de mantener la temperatura de salida dentro de las limitaciones estipuladas por el diseño, lo cual da como

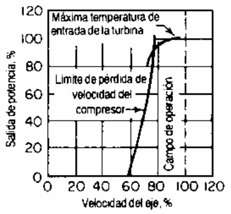


FIG. 24-31 Gama de operación de una turbina de gas de un solo eje, con varias velocidades y cargas. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

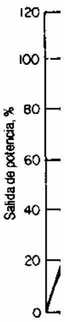


FIG. 24-32 Gama
velocidades y cargas.
nical Engineers., 7a.

resultado una reduc
las aplicaciones es

Las máquinas d
cidades de operaci
turbina de alta pres
de baja presión en
(véase la Fig. 24-3
en la turbina de pr
dades de operación
a la turbina de ma
flujo de aire. La s
cambia, y hace var
de la turbina de po

FIG. 24-33 Rendi
salida (*a*) y el consu
del 100% se denota
y (*b*) 90%, 3) Tempe
estipuladas. 4) Con
expulsión de una tur

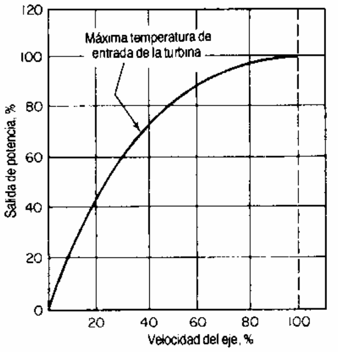


FIG. 24-32 Gama de operación de una turbina de gas de dos ejes, con varias velocidades y cargas. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

resultado una reducción subsecuente de potencia. En la mayor parte de las aplicaciones es necesario descargar la turbina durante el arranque.

Las **máquinas de dos ejes** más costosas ofrecen una gama de velocidades de operación más amplia, y estas unidades consisten en una turbina de alta presión que impulsa un compresor de aire y una turbina de baja presión en un eje separado, que genera la potencia de salida (véase la Fig. 24-32). Se puede utilizar una boquilla de área variable en la turbina de presión reducida para incrementar la gama de velocidades de operación. Debido a los cambios en la entrada de combustible a la turbina de mayor presión, cambian la velocidad y la cantidad del flujo de aire. La salida de potencia de la turbina de presión reducida cambia, y hace variar la cantidad de flujo de aire del área de la boquilla de la turbina de potencia (véase también la Fig. 24-33).

Características de operación El flujo de aire, expresado en peso por hora, que se suministra a una turbina de gas, es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del aire en la entrada del compresor y la presión de descarga de este último se determina de conformidad con las boquillas de la turbina (proporcional al flujo), lo cual da como resultado una reducción en la salida de potencia de la turbina durante la época de calor y una mayor potencia durante la época de frío. En zonas secas, el aire de entrada se puede enfriar por evaporación utilizando agua inyectada. En algunas localidades, la temperatura máxima de verano tiene una corta duración, y se puede obtener la potencia nominal incrementando la temperatura de la turbina durante dicho periodo breve, sin acortar notablemente la "duración de vida de la turbina". Con temperaturas extremas durante el invierno, las altas presiones del aire se sentirán a la entrada de la turbina y esto se debe tomar en consideración cuando se diseña una turbina de gas.

Puesto que la potencia que requiere el compresor es, aproximadamente, el doble que la salida del eje, un cambio de 1% en la eficiencia del compresor generará una alteración de 2% en la potencia del eje, y una variación de 1% en la eficiencia de turbina producirá un cambio de 3% en la potencia del eje. Por lo tanto, es importante que todas estas pérdidas se minimicen y que sean de dimensiones amplias las tuberías o los ductos de entrada y salida.

La turbina de gas se pone en funcionamiento, haciéndola que alcance la velocidad de **arranque** y manteniendo esta velocidad durante varios minutos, para purgar la carcasa. Algunas máquinas necesitan calentar con lentitud el rotor o la carcasa quemando una cantidad nominal de combustible en las cámaras durante varios minutos. La temperatura de entrada de la turbina se incrementa a continuación con cierta rapidez, hasta alcanzar un valor superior a la temperatura de diseño, con lo cual se genera la potencia necesaria para que la turbina alcance la velocidad de referencia o la velocidad plena. Algunas instalaciones requieren una válvula de disparo para evitar sobrecargas durante el arranque. Los requisitos de la potencia de arranque de una turbina de gas sin carga alguna son del orden del 5 al 10% del valor nominal, y la velocidad de arranque queda comprendida entre el 20 y el 30% de la velocidad a carga plena. Las turbinas de dos ejes requieren un poco de

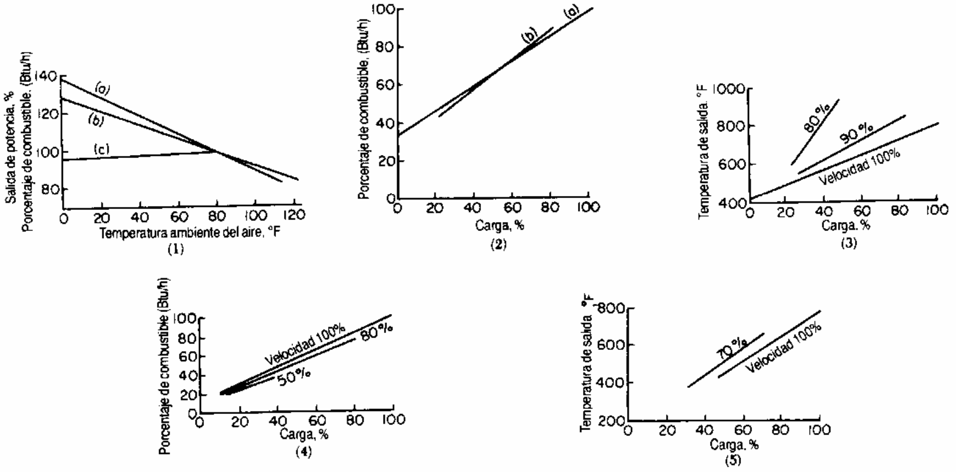


FIG. 24-33 Rendimiento de una turbina de gas con diversas velocidades, temperaturas y cargas. 1) Con una velocidad del 100%, la salida (*a*) y el consumo de combustible (*b*) se presentan como funciones de la temperatura ambiente: el combustible con una potencia del 100% se denota por medio de (*c*). 2) Consumo de combustible en una turbina de gas de un solo eje a 80°F, y (*a*) velocidad del 100% y (*b*) 90%, 3) Temperaturas de expulsión de una turbina de gas de un solo eje, a una temperatura ambiente de 80°F y con las velocidades estipuladas. 4) Consumo de combustible de una turbina de gas de dos ejes a diferentes cargas y velocidades. 5) Temperatura de expulsión de una turbina de gas de dos ejes a la temperatura ambiente de 80°F. °C = 5/9 (°F−32).

más potencia de arranque que las máquinas de un solo eje; pero, abriendo las boquillas de la turbina de baja presión, la carga no se mueve durante el arranque.

Las turbinas de gas emplean gran variedad de combustibles. Las principales **limitaciones de combustible** son que **1**) no forme cenizas que se depositen en los álabes y obstaculicen el buen funcionamiento, **2**) no contenga polvo que erosione los álabes, y **3**) no contenga vanadio no inhibido. Las turbinas de gas funcionan en la actualidad con gas combustible (natural y de refinería), gases para altos hornos, aceites combustibles o combustóleo (incluyendo residuos pesados), y se ha construido por lo menos una turbina experimental de gas que quema carbón.

La turbina de gas de ciclo sencillo es más o menos ineficiente, y casi todas sus pérdidas se deben a los gases calientes de expulsión. Cuando los gases de expulsión se pueden utilizar en una caldera o para el calentamiento de un proceso, la combinación de la turbina y el aparato de recuperación de calor da origen a una planta de gran eficiencia. Otro método que asegura un nivel alto de eficiencia consiste en integrar la turbina de gas con los requisitos del proceso.

A continuación se dan algunos ejemplos de turbinas de gas que se han utilizado en la industria: **1**) en el proceso Houdry se utilizó una turbina de gas para impulsar el compresor de aire de regeneración; **2**) el compresor de aire de una turbina de gas puede fabricarse en un tamaño mayor para abastecer aire presurizado para el funcionamiento de altos hornos; **3**) la supresión de las últimas etapas de la turbina suministra aire de regeneración caliente a presiones nominales; **4**) en sistemas de calderas presurizadas, la turbina impulsa al compresor y actúa como economizador reduciendo la temperatura del gas de salida de la caldera; **5**) en el caso de grandes estaciones centrales, las turbinas de gas se han utilizado para impulsar bombas de alimentación de caldera y aire de combustión caliente para la misma, y **6**) el empleo de calderas de calor de desecho instaladas en la salida es la manera más común y fácil de mejorar la eficiencia de una turbina de gas de ciclo sencillo.

Si el calor de los gases de salida no se puede utilizar para aplicaciones de procesos, entonces, la planta de turbina de gas sólo alcanza mayor eficiencia mediante la aplicación de interenfriadores en los compresores, recalentamiento en el sistema de la turbina y regeneración para recuperar el calor de salida. Estas plantas son costosas y usualmente alcanzan eficiencias que se limitan del 30 al 34%.

TURBINAS DE EXPANSIÓN

Básicamente, una turbina de expansión es un dispositivo que convierte la energía de presión de una corriente de un gas o vapor en trabajo mecánico debido a la expansión del gas o vapor al pasar por la turbina. Sin embargo, el trabajo mecánico es sólo un subproducto, puesto que el objetivo fundamental del turboexpansor es enfriar el gas de proceso. Los turboexpansores tienen una aplicación muy amplia en el campo criogénico para producir la refrigeración requerida para la separación y licuefacción de gases.

Los términos comunes de "turboexpansores" y "turbinas de expansión" excluyen en forma específica las turbinas de vapor y las turbinas de gas de combustión, que se tratan en otra parte de esta Sección.

Cualquier trabajo desarrollado por el turboexpansor es a costa de la entalpía de la corriente de proceso, que es enfriada. Una baja temperatura de entrada significa baja temperatura de salida, y a un intervalo de temperaturas más reducido, la expansión se hace más eficiente en el proceso.

DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Cuando el turboexpansor se combina con un compresor y un intercambiador de calor, funciona como bomba de calor y su análisis es como sigue: En la figura 24-34, considérese el compresor y el enfriador como compresor isotérmico que trabaja a una temperatura T_2 con una eficiencia E_C y, supóngase que el fluido de trabajo es un gas ideal. Además, la eliminación adicional de calor Q_e por el turboexpansor es a una baja temperatura promedio, T_1. Esto requiere que el trabajo de eje liberado sea igual a Q_e. Supóngase, de manera razonable, que se utiliza un décimo de la caída de temperatura en el expansor para la diferencia de temperaturas en el intercambiador de calor. Si la eficiencia del turboexpansor es N_e y se multiplica por 0.9 para incluir el efecto de la diferencia de temperatura en el intercambiador de calor, la caída ideal de entalpía necesaria a través del expansor será:

$$H_e = Q_e/0.9N_e \qquad (24\text{-}15)$$

El trabajo teórico de compresión (isotérmico) requerido en el compresor, que se supone opera isotérmicamente a T_2, será

$$(Q_e/0.9N_e)(T_2/T_1) \qquad (24\text{-}16)$$

El trabajo real del compresor W_c es esta última cantidad, dividida entre la eficiencia isotérmica del compresor N_c; es decir,

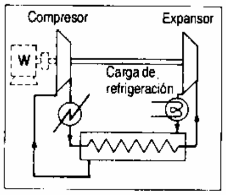


FIG. 24-34 Sistema turboexpansor funcionando como una máquina de refrigeración

$$W_c = (Q_e/0.9N_eN_c)(T_2/T_1) \qquad (24\text{-}17)$$

El trabajo mecánico igual a $Q_e/0.9$ es retornado por el expansor al compresor, de manera que el trabajo neto al compresor será:

$$W = W_c - \frac{Q_e}{0.9} = \left(\frac{Q_e}{0.9}\frac{T_2}{N_eN_cT_1}\right) - \frac{Q_e}{0.9}$$
$$W = \left(\frac{Q_e}{0.9}\frac{T_2}{N_eN_cT_1}\right) - 1 = \frac{Q_e}{0.9}\left(\frac{T_2 - N_eN_cT_1}{N_eN_cT_1}\right) \qquad (24\text{-}18)$$

El trabajo teórico, de acuerdo con la segunda ley, será:

$$W_{\text{teór}} = Q_e\frac{T_2 - T_1}{T_1} \qquad (24\text{-}19)$$

De lo anterior, se concluye que la eficiencia de acuerdo con la segunda ley para el sistema expansor-intercambiador de calor-compresor, será:

$$\frac{W_{\text{teór}}}{W} = \frac{Q_e\dfrac{T_2 - T_1}{T_1}}{\dfrac{Q_e}{0.9}\left(\dfrac{T_2 - N_eN_cT_1}{N_eN_cT_1}\right)} \qquad (24\text{-}20)$$
$$= \frac{0.9(T_2 - T_1)N_eN_c}{T_2 - N_eN_cT_1}$$

La gráfica mostrada e
este equipo.
La familia de curv
cia respecto a la pot
cionales. Las curvas
Data Book de Gas Pr
ma. Los datos se refi
en que se elimina la r
enfriar una corriente
la eficiencia será m
para diversos interv
paración de estas c
muestra que los requ
pansión es favorabl
menores de 360°R (-
recida por una temp

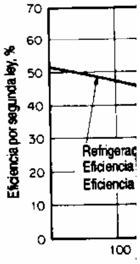


FIG. 24-35 Trabajo
sor. K = 5/9°R; °C = 5/

Otra conclusión q
proceso puede justi
para aplicar medios
ban calor a temperat
biente, hasta 360°R,
ra cualquier caso.

CARACTERÍSTI

En la figura 24-36 s
flujo radial son, cas
ción de aspas de im
pulsor de una bom
forma tangencial ha
el interior en direcc
chorro gracias al án
un movimiento gir
Las turbinas de fl
ducciones de bajas
mo dispositivos de
Entre las caracte
siguientes:
1. Gran eficien
2. Operan casi
3. Funcionan c
blece una velocida
4. Soportes qu
5. Sellos de eje
6. Construcció
7. Alta confiab

urbinas de gas que se
Houdry se utilizó una
e de regeneración; 2)
le fabricarse en un ta-
el funcionamiento de
as de la turbina sumi-
nominales; 4) en siste-
al compresor y actúa
del gas de salida de la
trales, las turbinas de
mentación de caldera
el empleo de calderas
manera más común y
as de ciclo sencillo.
tilizar para aplicacio-
gas sólo alcanza ma-
friadores en los com-
rbina y regeneración
son costosas y usual-
al 34%.

ior

o una máquina de refri-

(24-17)

or el expansor al com-
or será:

(24-18)

ey, será:

(24-19)

uerdo con la segunda
alor-compresor, será:

(24-20)

La gráfica mostrada en la figura 24-35 es una curva de expansión para este equipo.

La familia de curvas cortas de la figura 24-35 muestra la eficiencia respecto a la potencia de los sistemas de refrigeración convencionales. Las curvas más recientes se han tomado del *Engineering Data Book* de Gas Processors Suppliers Association, Tulsa, Oklahoma. Los datos se refieren a la temperatura del evaporador en el punto en que se elimina la refrigeración. Si la refrigeración se emplea para enfriar una corriente en un intervalo de temperaturas, lógicamente la eficiencia será menor. Las curvas cortas de la figura 24-35 son para diversos intervalos de temperaturas de refrigeración. Una comparación de estas curvas con las correspondientes al expansor, muestra que los requisitos de potencia para la refrigeración por expansión es favorable con refrigeración mecánica a temperaturas menores de 360°R (−100°F). La eficiencia del expansor se ve favorecida por una temperatura más baja de eliminación de calor.

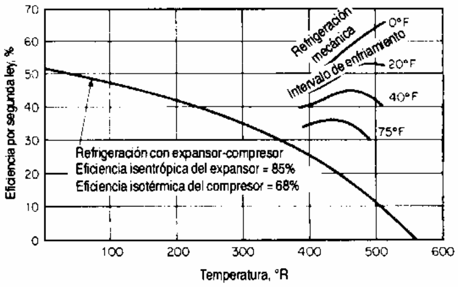


FIG. 24-35 Trabajo mecánico de refrigeración contra trabajo del turboexpansor. K = 5/9°R; °C = 5/9 (°F − 32).

Otra conclusión que puede inferirse de la figura 24-35 es que, si el proceso puede justificar su complejidad, será más eficiente y potente para aplicar medios convencionales en lugar de expansores que absorban calor a temperaturas moderadas en el intervalo de temperatura ambiente, hasta 360°R, aunque por comodidad se utilizan expansores para cualquier caso.

CARACTERÍSTICAS ESPECIALES

En la figura 24-36 se muestra un turboexpansor usual. Las turbinas de flujo radial son, casi siempre, de una sola etapa y tienen una combinación de aspas de impulso y reacción y un rotor que se asemeja al propulsor de una bomba centrífuga. El gas se transporta por chorro en forma tangencial hacia la periferia del rotor, y corre radialmente hacia el interior en dirección del ojo, de donde el gas se vuelve a enviar por chorro gracias al ángulo de los álabes, de manera que sale del rotor sin un movimiento giratorio y fluye axialmente alejándose del mismo.

Las turbinas de flujo radial se desarrollaron esencialmente para producciones de bajas temperaturas, pero también se pueden emplear como dispositivos de recuperación de potencia.

Entre las características más notables de estas máquinas están las siguientes:

1. Gran eficiencia: 75 a 88%
2. Operan casi siempre a temperaturas muy bajas
3. Funcionan con corrientes pequeñas o moderadas, lo cual establece una velocidad de rotación bastante alta
4. Soportes que tienen baja conductividad calorífica
5. Sellos de eje eficaces para conservar la corriente de proceso
6. Construcción para trabajos pesados, resistente a un uso excesivo
7. Alta confiabilidad

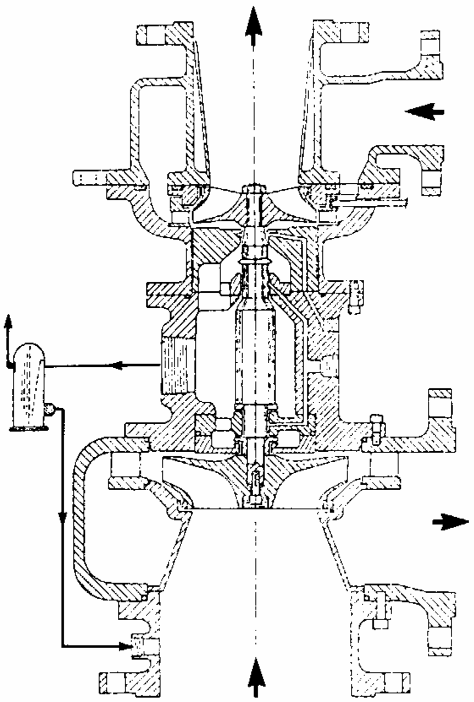


FIG. 24-36 Turboexpansor de flujo radial común. La rotación es para valores arriba de 90°, en sentido contrario a las manecillas del reloj. (*Rotoflow Corp.*)

Las limitaciones de operación que se establecen, por lo común, en el caso de los turboexpansores sin características especiales de diseño son una caída de entalpía de 93 a 116.3 kj/kg (40 a 50 Btu/lb) por etapa de expansión y una velocidad de punta de rotor de 304.8 m/s (1000 ft/s). Se producen turboexpansores comerciales hasta con 20.68 MN/m^2 (3000 lbf/in^2) y temperaturas de entrada de casi cero absoluto a 538°C (1000°F). La condensación líquida permisible en la corriente de expansión varía con la presión de descarga: ésta puede ser del 50% de peso o más en la descarga, a condición de que el turboexpansor se haya diseñado específicamente para manejar la condensación.

DISEÑO DE FLUJO RADIAL

El diseño de reacción radial se ha seleccionado muy especialmente para los turboexpansores, debido a que es posible lograr la eficiencia más alta en cualquier diseño de turbinas; además, existen varias características adicionales que favorecen esta aplicación.

1. En una configuración de etapa sencilla es usual tener el rotor al final del eje; esto brinda la oportunidad de poder aislar térmicamente la parte fría de la turbina y es un arreglo ideal para la descarga axial.

2. Este diseño permite el empleo de boquillas primarias variables en las que es posible alcanzar una alta eficiencia en un intervalo amplio de flujo.

3. Aplica un empuje axial al eje, menor que en una turbina de reacción axial de etapa sencilla.

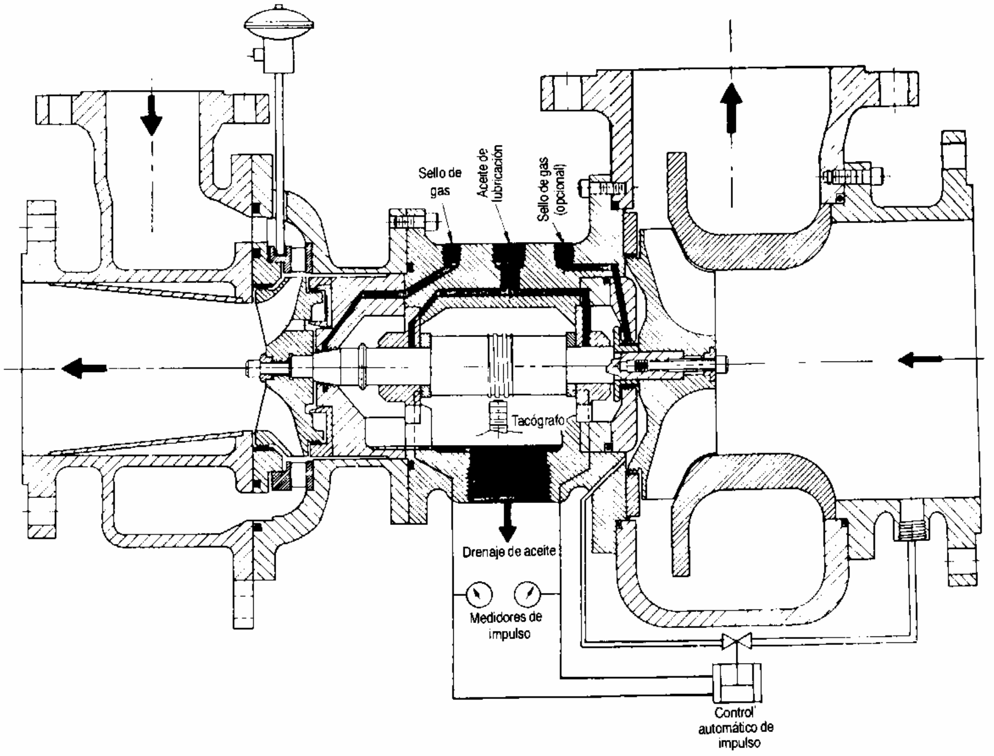


FIG. 24-36 (*Continúa*)

4. Cuenta con cojinetes del eje sólo en un lado del rotor del expansor, y se dispone de manera conveniente el aislamiento de la barrera de calor entre los cojinetes lubricados calientes y la turbina fría.

5. Su velocidad es razonablemente aceptable para dispositivos adecuados de carga.

EFICIENCIA

La eficiencia de un turboexpansor se calcula sobre la base de la expansión isentrópica mejor que la politrópica, aunque su valor no sea 100%. Esto sucede debido a pérdidas ocasionadas por la descarga de la máquina en forma de fugas del sello y fricción de los discos, que calientan el gas que se fuga entre los sellos y provoca pérdidas en el convertidor. (El convertidor actúa como transformador de la energía de velocidad axial del rotor en energía de presión.)

COJINETES

Cojinetes radiales Los cojinetes o rodamientos antifricción no son muy adecuados para estas aplicaciones, debido de manera primordial a la atención y mantenimiento especiales que demandan.

Todos los expansores tienen conjinetes de anillo lubricado. La ventaja de estos cojinetes de anillo es que pueden diseñarse para soportar la transmisión de manera rígida, en forma tal que es posible diseñar la película crítica de aceite (crítica principal) para que el expansor opere de manera segura a velocidades superiores a la de diseño. Esto es deseable porque así se eliminan todas las vibraciones del eje de transmisión en el intervalo completo de operación; esto adquiere una importancia especial si las velocidades críticas son menores a las de diseño, donde este modelo de ensamble del eje podría rotar alrededor de su centro de gravedad. Es frecuente que existan depósitos de hielo en los turboexpansores, lo que origina la existencia de cierto desequilibrio en el giro con el consecuente daño en los sellos del eje.

En un arreglo en el que el eje gira con velocidad inferior a la principal crítica (película de aceite), la velocidad no puede ir más allá de la velocidad de diseño a causa de la formación de remolinos de aceite (giro a velocidad media). La sustitución de las zapatas de inclinación de los cojinetes por collares sirve para que la formación de remolinos de aceite sólo pueda suceder a altas velocidades, pero no sirve para prevenir la rotación fuera de su centro de gravedad. Las zapatas de los cojinetes no se lubrican de manera adecuada con velocidades altas y diámetros de eje pequeños.

Los collares de los cojinetes tienen la ventaja adicional de funcionar como si existiera lubricación y operan como sellos presurizados del eje para contener la presión en el gas de proceso (véase "Sellos para ejes").

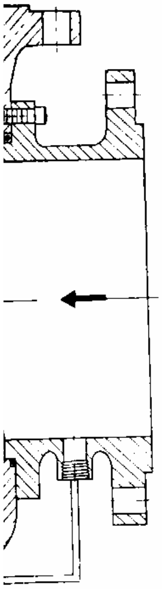
Cojinetes de empuje Los turboexpansores pueden tener perturbaciones o ser obstruidos a consecuencia de la formación de hielo, lo

que da por resultado
aplicaciones donde l
(5 o 10 atm), el mej
suele ser insuficiente
empuje. La unidad d
diante la colocación
a través del rotor y l
Los medidores de
contra la carga exce
proporciona un con
control de la presión

SELLOS

Sellos para ejes
turboexpansores, p
ción: requieren ser
prestarse a ellos es
se utilizan sellos tip
de inyección entre
tiguamiento para p
gas escapa, es prec
tóxico o caro, es po
extender la carcasa
conjinete actúe co
y disponer de él de
Para aplicacion
conservarse por co
sellarse hermética
cidad. El eje de ba

FIG. 24-37 Bo



ma tal que es posible
:ipal) para que el ex-
erioresaladediseño.
/ibracionesdelejede
ón; esto adquiere una
son menores a las de
odría rotar alrededor
an depósitos de hielo
:ia de cierto desequi-
:llos del eje.
ıd inferior a la princi-
uede ir más allá de la
: remolinos de aceite
apatas de inclinación
mación de remolinos
s, pero no sirve para
ad. Las zapatas de los
n velocidades altas y

dicional de funcionar
s presurizados del eje
se "Sellos para ejes").
pueden tener pertur-
ormación de hielo, lo

que da por resultado un daño muy grave en las variaciones de carga. En aplicaciones donde la presión tiene un valor entre 506.6 y 1013.2 kPa (5 o 10 atm), el mejor cojinete de empuje que se tenga en existencia suele ser insuficiente para proteger el turboexpansor de estas cargas de empuje. La unidad de turboexpansión se previene, en cierto grado, mediante la colocación de indicadores como los de la presión diferencial a través del rotor y la temperatura de estos cojinetes.

Los medidores de carga de los cojinetes de empuje para protección contra la carga excesiva, están colocados en los cojinetes y también se proporciona un control de empuje automático, que funciona mediante control de la presión antes de un tambor de balanceo.

SELLOS

Sellos para ejes Este tipo de sellos no son muy aceptables para turboexpansores, por la misma razón general que los cojinetes antifricción: requieren ser sustituidos periódicamente y la atención que debe prestarse a ellos es muy grande. Cuando ya se colocan, por lo general, se utilizan sellos tipo laberinto. Estos sellos tienen un punto intermedio de inyección entre los dos extremos, en el que se inyecta gas de amortiguamiento para prevenir el escape del gas de proceso, ya que si algún gas escapa, es precisamente el de amortiguamiento. Si este gas no es tóxico o caro, es posible enviarlo a la atmósfera; sin embargo, se puede extender la carcasa del expansor hasta la del cojinete y permitir que el conjinete actúe como aceite sellador a fin de recolectar el gas de fuga y disponer de él de la manera más adecuada.

Para aplicaciones de refrigeración en las que el refrigerante debe conservarse por completo, la carcasa del expansor y el cojinete pueden sellarse herméticamente mediante un prensaestopas reductor de velocidad. El eje de baja velocidad de la caja prensaestopas se sella con un

FIG. 24-37 Boquillas primarias y rotor.

sello mecánico de baja velocidad. De esta manera, cualquier fuga de refrigerante del sello tipo laberinto queda contenida por completo en la caja prensaestopas y en el sistema cerrado de lubricación para su completa recolección y reuso.

Sellos para rotor Para equilibrar el empuje en el rotor casi siempre se dispone de uno o dos sellos tipo laberinto en el rotor. Este tipo de sellos se ven dañados cuando el fluido de entrada o gas contiene polvo, y el uso en los sellos laterales causa serios disturbios en los cojinetes de empuje de carga. Se debe contar con las previsiones necesarias para la recolección y desecho del polvo que tiende a acumularse en el sello, con lo que se prevendrá a éste de una erosión importante.

BOQUILLAS VARIABLES

El vapor de proceso presurizado se introduce al rotor en forma radial gracias a las boquillas o toberas primarias, que son una serie de aspas que sirven para la formación de chorros de gas de manera tangencial dentro del rotor. Estas aspas se sujetan entre dos anillos planos, en forma tal, que puedan girar en armonía para abrir o cerrar los espacios entre ellos y de esta forma variar las áreas de estrangulamiento de las boquillas. Ésta es una función muy importante porque así es como puede variarse el flujo que pasa por el expansor sin que exista un estrangulamiento de desperdicio: toda la energía de expansión en las boquillas se recupera en el rotor. Estas boquillas variables desde el punto de vista control pueden actuar exactamente como válvulas de estrangulamiento y como controladores del flujo (pero sin pérdida de estrangulación) y es posible utilizar instrumentación convencional de control de flujo para operarlas.

RESONANCIA DEL ROTOR

Las boquillas variables producen una serie de chorros de gas que entran al rotor y estos impulsos se suman y crecen hasta crear una frecuencia igual a la de las aspas: el número de revoluciones por segundo multiplicado por el número de aspas es del orden de miles de ciclos por segundo. El rotor llega a resonar con esta frecuencia y, si ocurre esto, llega a fatigarse y agrietarse; estos trastornos son tan decisivos que deben evitarse y el usuario deberá solicitar al fabricante toda la información referente a este aspecto.

CORRIENTES DE CONDENSACIÓN

Es ventajoso tener el expansor operando a la temperatura más baja posible en el proceso (véase la Fig. 24-35), pero esto será causa frecuente de alcanzar la temperatura de condensación de la corriente de proceso. Las turbinas de vapor cuentan con previsiones contra la operación con corrientes de flujo condensado porque éstas afectan la eficiencia de la unidad y provocan erosión en las aspas del rotor.

Otra ventaja de la turbina de reacción radial es que puede diseñarse para aceptar cualquier cantidad de condensación sin que se reduzca su eficiencia o se cause erosión*. Esto es posible debido a la acción de dos fuerzas que actúan sobre las partículas de niebla suspendidas: fuerza de desaceleración y fuerza centrífuga, y estas dos fuerzas se pueden equilibrar entre sí para prevenir los golpes a las aspas a consecuencia del goteo, sobre todo cuando éstas son de diseño especial. Este proceso se explica a continuación.

Esta expansión de un vapor condensante es muy deseable desde el punto de vista termodinámico, pero el líquido no debe bombardear y erosionar las aspas del rotor y en particular no se debe acumular en el rotor, ya que podría ocasionar pérdida de eficiencia. Si se forman gotas

*Este mismo principio se aplica a la expansión de líquidos de vaporización súbita, donde las burbujas se trasladan lejos de las aspas.

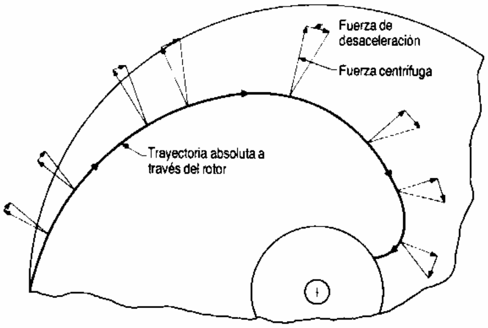


FIG. 24-38 Trayectoria elemental de forma radial en el interior y después axial a través del rotor.

de líquido cuando el gas se expande en el turboexpansor, es posible pensar que debería utilizarse un diseño de flujo radial; pero la explicación siguiente mostrará que éste es el único diseño que sirve para efectuar la expansión de manera eficiente.

En la figura 24-37 se muestran las boquillas primarias y el rotor. Casi la mitad de la caída de presión tiene lugar en las boquillas primarias, que envían el gas en forma de chorro tangencial en la periferia del rotor. El enfriamiento tiene lugar durante la expansión y la corriente en forma de chorro que entra al rotor puede convertirse en neblina. En esta condición, el gas fluye de manera radial con el rotor, y es descargado en un punto cercano al centro del rotor; esto sucede sin movimiento de rotación. La segunda parte de la energía de expansión se gasta mediante el paso del gas en forma radial a través del rotor contra la fuerza centrífuga y una precipitación posterior de líquido.

La corriente de las boquillas entra al rotor a una velocidad aproximada de 152.4 o 304.8 m/s (500 o 1000 ft/s; véase la Fig. 24-38) y sigue una trayectoria curva a través del rotor, a un grado en que la fuerza centrífuga que actúa en un elemento de la corriente y, por lo mismo, en las gotas suspendidas es del orden de 75 000 G (75 000 veces la fuerza de gravedad). La corriente también se mueve radialmente en el rotor, desde su velocidad tangencial de 304.8 m/s (1000 ft/s) hasta un valor cero cuando el rotor sólo tiene media revolución. Esta fuerza de desaceleración es del orden de 10 000 G. El vector suma de estas dos fuerzas, totaliza entre 75 000 y 100 000 G en una dirección 5 a 10 desde la dirección radial (véase la Fig. 24-38). Esta es una dirección aceptable para las aspas, de manera que el problema de evitar el bombardeo de las aspas por las gotas de condensado debe resolverse diseñando la forma de las aspas del rotor del expansor paralelas a este vector resultante. Así es como se evita la existencia de fuerzas que causen goteo en cualquier superficie. Éstas arrastran la corriente hacia atrás ligeramente, mas pueden ser acarreadas por la corriente principal y ser descargadas. Mediante este método es posible transportar cualquier cantidad de líquido o, en el caso de líquidos de vaporización súbita que se expanden, las burbujas pueden pasar a través del expansor sin pérdida de eficiencia. Sería imposible construir las aspas de turbina para que cumpla este requisito, sin el establecimiento de dos fuerzas vectoriales.

APLICACIONES

Los turboexpansores son importantes en las siguientes aplicaciones:

1. Separación de aire
2. Recuperación de condensables del gas natural
3. Licuefacción de gases, incluido el helio
4. Aumento en la refrigeración en diversos procesos criogénicos como la recuperación de etileno
5. Generación de potencia, algunas veces denominada recuperación de potencia

Una aplicación potencial de los turboexpansores para la recuperación de potencia se presenta siempre que un gran flujo de gas puede reducirse desde una presión alta a una más baja o cuando se dispone de corrientes de proceso a alta temperatura (calor de desperdicio), para causar la ebullición a un líquido secundario. Cuando existe tal condición, debería evaluarse si se justifica su utilización en un turboexpansor. En este caso, el turboexpansor podría utilizarse como unidad motriz de una bomba, un compresor o un generador eléctrico, para recuperar gran parte de esa energía de desperdicio. En aplicaciones de este tipo se debería prestar especial atención a la caída de temperatura que tiene lugar en el expansor. En ciertas ocasiones será necesario calentar o atomizar el gas de entrada, para evitar bajas temperaturas de salida que podrían ser el origen de la formación de hielo o líquidos.

Los expansores pueden utilizarse, ya que su desarrollo se encuentra en un estado muy avanzado y es posible contar con expansores de gran eficiencia a precios relativamente bajos.

LUBRICACIÓN

Los cojinetes de los expansores se diseñan casi siempre para altas velocidades, razón por la que deberían contar con una lubricación adecuada. Esto se puede asegurar con lubricación a presiones del orden de 689.5 kN/m^2 (100 lbf/in^2) o más. No hay especial objeción a tener presiones hasta de 6.895 MN/m^2 (1000 lbf/in^2) o aún mayores, si es que existe alguna razón para que así suceda.

Casi por regla general se combinan un cojinete de muñón con otro de empuje en un solo conjunto, inyectando aceite en ambos. La velocidad de flujo se ajusta de manera que pueda eliminarse el calor y mantenerse la elevación de temperatura entre 11 a 17°C (20 a 30°F).

Los expansores más pequeños utilizan aceite con viscosidad de 60 a 100 SSU a temperatura de 38°C (100°F), y las máquinas grandes requerirán un aceite cuya viscosidad tenga valores hasta de 500 SSU. Si el aceite se mantiene en un sistema cerrado en contacto con un hidrocarburo o cualquier otro gas parcialmente soluble, éste debería disolverse para reducir la viscosidad del aceite, por lo que será necesario contar con un compensador de alta viscosidad, para que la viscosidad de trabajo después de la última etapa de equilibrio conserve sus propiedades para lubricar los cojinetes.

El sistema de lubricación deberá, por razones de confiabilidad, mantenerse en operación y contará con un sistema de apoyo para su alimentación, además de una filtración adecuada desmontable. Si se presentaran problemas de incrustamiento por agua fría, los enfriadores deberían ser desmontables.

SISTEMA DE GAS DE AMORTIGUAMIENTO

El sello para ejes (véase la subsección "Sellos para ejes") suele ser de tipo laberinto con claros muy estrechos. Es deseable que se cuente con un gas de amortiguamiento presurizado adecuado para inyección en el punto intermedio del sello y este gas debe estar disponible a una presión absoluta mayor que la presión más grande de la flecha que se va a sellar. El sistema de sello de gas puede consistir sólo en un filtro, un dispositivo indicador de flujo y una válvula de estrangulamiento u otro controlador de flujo o presión que casi siempre es un regulador de presión y una válvula de aguja graduada.

Si la presión disponible no es mayor que la presión que se va a sellar, entonces no será suficiente estrangular de la manera más sencilla el flujo, cuando las dos presiones son casi iguales. Entonces, el control más preciso puede tenerse por presión diferencial entre la presión del proceso y la presión del gas.

ɪrocesos criogénicos
nominada recupera-
res para la recupera-
n flujo de gas puede
cuando se dispone de
le desperdicio), para
ando existe tal condi-
ón en un turboexpan-
rse como unidad mo-
ador eléctrico, para
cio. En aplicaciones
a la caída de tempe-
s ocasiones será ne-
ara evitar bajas tem-
a formación de hielo
sarrollo se encuentra
n expansores de gran
siempre para altas ve-
una lubricación ade-
presiones del orden de
l objeción a tener pre-
ún mayores, si es que
te de muñón con otro
te en ambos. La velo-
inarse el calor y man-
7°C (20 a 30°F).
con viscosidad de 60
las máquinas grandes
res hasta de 500 SSU.
en contacto con un hi-
luble, éste debería di-
r lo que será necesario
para que la viscosidad
rio conserve sus pro-
nes de confiabilidad,
ema de apoyo para su
da desmontable. Si se
ua fría, los enfriadores

MIENTO

para ejes") suele ser de
able que se cuente con
lo para inyección en el
r disponible a una pre-
de la flecha que se va a
ir sólo en un filtro, un
strangulamiento u otro
es un regulador de pre-
esión que se va a sellar,
nanera más sencilla el
s. Entonces, el control
ial entre la presión del

SELECCIÓN DEL TAMAÑO

El tamaño, la velocidad de rotación y la eficiencia pueden correlacionarse adecuadamente con la carga isentrópica disponible, el flujo volumétrico en la descarga y la relación de expansión a través del turboexpansor. La carga, el flujo volumétrico y la velocidad de rotación se correlacionan mediante la velocidad específica. En la figura 24-39 se muestra la eficiencia a diversas velocidades específicas para varios tamaños del rotor. Esta figura presupone que la relación de expansión será menor de 4:1. Cuando la relación de expansión es superior a 4:1 ocurren ciertas pérdidas supersónicas y debe introducirse una corrección adicional a la eficiencia, como se muestra en la figura 24-40.

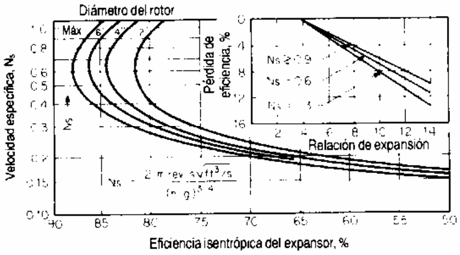


FIG. 24-39 Eficiencia a diversas velocidades específicas, para diversos tamaños de rotor.
FIG. 24-40 Pérdida de eficiencia, como función de la relación de presión.

Por regla general, la carga isentrópica disponible se determina mediante cálculos a partir de ecuaciones de estado. En ausencia de cálculos mediante computadora, como es el caso citado, se puede seguir el siguiente proceso de cálculo. De hecho, este cálculo es valioso como una verificación de otros métodos porque su exactitud es adecuada:

si;
R = Constante de los gases, 1.986 T_a = Temperatura promedio, °R
Z_a = Factor de compresibilidad a T_a H_i = Trabajo isentálpico,

$$H_t = \frac{RT_aZ_a}{\text{mol. wt.}} \ln \frac{P_1}{P_2} \qquad \text{Btu/lb} \qquad (24\text{-}21)$$

donde H_t = caída de entalpía reversible, Btu/lb
R = constante de los gases, 1.986 Btu/(lb · mol · °R)
T_a = Temperatura promedio para el incremento, °R
Z_a = compresibilidad promedio para el incremento
P_1/P_2 = relación de presiones

El empleo de esta ecuación requiere valores promedio de P y T basados en un incremento supuesto, para determinar Z.

INSTRUMENTACIÓN

El control de flujo en el proceso y el control del gas de amortiguamiento se han analizado antes bajo los títulos de "Boquillas variables" y "Sistemas de amortiguamiento del gas", respectivamente. La velocidad es autocontrolable casi siempre mediante la igualación de la carga sensible con la velocidad a través de un compresor o una bomba. Si la carga se tiene por alimentación con un generador sincrónico o de inducción en un sistema estable de ca, el sistema fijará la velocidad. De lo contrario, la velocidad podrá controlarse mediante un controlador convencional.

Es común el empleo de diversos instrumentos de protección, a fin de prevenir un corte en la señal (p. ej., una válvula de acción rápida en la entrada del expansor), que puede provocar cambios en la velocidad, presión del lubricante, temperatura del cojinete, detención en el movimiento de la flecha, nivel del lubricante, carga del cojinete de empuje, cambios en las variables de proceso, como temperaturas, niveles, presiones, etc., y ocasionar congelamiento. Sin embargo, demasiados dispositivos de seguridad contra cortes pueden ser muy molestos.

RECUPERACIÓN DE POTENCIA A PARTIR DE CORRIENTES DE LÍQUIDOS

PRINCIPIOS BÁSICOS

El potencial para la recuperación de potencia a partir de corrientes de líquidos existe en cualquier tiempo en que se tenga una corriente de líquido proveniente de una fuente de alta presión a otra de baja presión, de manera que se produzca un estrangulamiento o una aceleración para disipar la presión. Dicho estrangulamiento representa un potencial de sistemas para potencia, que es la inversa de una bomba; dicho de otra manera, un potencial para la extracción de potencia. Al igual que sucede en una bomba, existe una potencia o caballaje hidráulico y un caballaje de frenado, excepto que en la recuperación se trata de caballajes generados o disponibles.

Básicamente, la recuperación de potencia de líquidos se logra en instalaciones industriales en la forma de caballaje de flecha. Aunque esto podría aparecer potencialmente como potencia reciprocante u oscilante, o bien, de rotación, la mayor parte de las aplicaciones de mayor tamaño son de rotación. El estudio de la posibilidad de recuperar potencia de líquidos comprende una elección entre varias aplicaciones posibles, y casi siempre sucede que dicha elección comprende los siguientes aspectos como alternativas: 1) impulsar unos cuantos servicios con caballajes sustanciales, en contraste con impulsar más servicios de menor caballaje; 2) impulsar servicios esenciales en contraposición a no esenciales o servicios de reserva por contraposición a los que no lo son; 3) impulsar una sola transmisión en comparación con una transmisión parcial, o un caballaje pleno en contraposición con un caballaje parcial, para servicios selectos; 4) convertir la energía de recuperación de potencia en otra forma intermedia, como, por ejemplo, mover un generador eléctrico.

Al aplicar la recuperación de potencia, se presentan tres problemas básicos que son: 1) limitaciones en el diseño del equipo para recuperar la potencia, 2) resistencia operacional a considerar equipos rotatorios que no sean absolutamente necesarios, y 3) la forma de evaluar el aspecto económico del sistema instalado. Es importante reconocer que siempre se cuenta con una alternativa aceptable y funcional para recuperar potencia de corrientes de líquidos, en la forma de una válvula de estrangulamiento o de descenso, mientras que, en el caso de la bomba, no existe un sustituto simple, barato y a prueba de fallas.

Las consideraciones de la capacidad del fluido en movimiento disponible, la presión diferencial de que se dispone para recuperar la potencia y las propiedades corrosivas o erosivas de la corriente de fluido, son consideraciones básicas para establecer si tal recuperación es factible, sin tomar en cuenta los aspectos económicos. Otro aspecto importante para determinar la factibilidad y los aspectos económicos es la ubicación física probable y la interrelación con las fuentes del fluido, el punto de producción de la potencia y el destino final del fluido. En general, la tendencia observada ha consistido en localizar el impulsor de recuperación de potencia y la unidad impulsada, en donde lo dictaminan las necesidades de la unidad impulsada y utilizar tuberías

de entrada y salida al impulsor, para conducir el fluido de recuperación. Aunque las primeras instalaciones eran para servicios no corrosivos y no erosivos, como, por ejemplo, aceite de absorción rico en hidrocarburos, la tendencia ha demostrado que, ahora, las unidades se dedican a servicios más o menos severos, como plantas de aminas, unidades de carbonato calientes y el descenso de hidrodisociadores.

Consideraciones económicas Las unidades de recuperación de potencia no tienen costos de operación; en esencia, la energía se tiene libremente y, además, no hay un costo de capital incrementado, debido al abastecimiento de la misma. Los costos instalados incrementales de un sistema de energía para un propulsor de turbina de vapor y su sistema de abastecimiento representan aproximadamente 250 dólares por kilowatt, y el costo incremental de un propulsor de motor eléctrico más el sistema de abastecimiento es, aproximadamente, 25 dólares por kilowatt. Por el contrario, incluso a la presión de entrada más elevada, las máquinas de recuperación de potencia de los flujos más grandes rara vez tienen un costo de equipos superior a 45 dólares por kilowatt y, a menudo, los costos se reducen hasta 20 dólares por kilowatt. No obstante, a los simples costos de propulsor (sin incluir el abastecimiento de energía) de 20 a 45 dólares por kilowatt para la unidad motriz de recuperación de potencia en contraposición a, aproximadamente, 8 a 25 dólares por kilowatt en las turbinas de vapor o 15 a 20 dólares por kilowatt en motores eléctricos, se debe tomar en cuenta que los costos de operación hacen que las unidades de recuperación sean atractivas. Si se utilizan los valores comúnmente aceptados para los costos de energía, los flujos de vapor de turbina y los precios de venta de vapor, los costos de operación para cualquiera de los motores o las turbinas de vapor se acercan a 80 dólares por año para 746 W (1 hp).

Por consiguiente, quitando las dificultades técnicas o las consideraciones operacionales de la aplicación, las unidades de recuperación de potencia deben mostrar cierta recuperación en menos de 6 meses. Las recuperaciones reales del proyecto son del género de 1 a 3 años. Esta diferencia se debe, sobre todo, a 1) el hecho de que, aunque los costos incrementales utilizados con anterioridad son válidos para comparar sistemas grandes, los diseños específicos se deben enfrentar a diferencias en los tamaños de marcos, capacidades y caballajes estandarizados, requisitos de código, etc., 2) los requisitos de operación, las consideraciones de reserva y cierta falta de seguridad en las unidades de recuperación originadas en ausencia de amplia experiencia, dan origen a patrones de selección de equipos que se desvían de las comparaciones directas.

Desarrollo La siguiente exposición se relaciona específicamente con el empleo de lo que se podría llamar turbinas de recuperación de potencia de bomba centrífuga y flujo radial hacia adentro. Esto no se aplica al tipo de unidad que se acostumbra en la industria hidroeléctrica para el área de diferencial de presión bajo a mediano, con un gran caballaje y flujo abundante de las turbinas hidráulicas del tipo de engranaje intermedio Pelton o Francis. Parece haberse registrado muy poca transferencia directa de los conceptos de diseño entre estos dos campos; los principales fabricantes del campo hidroeléctrico no han realizado hasta ahora grandes esfuerzos por vender sus productos a las industrias elaboradoras y las configuraciones físicas de sus unidades, desarrolladas a partir de los requisitos característicos del campo hidroeléctrico, no son apropiadas para la mayor parte de las aplicaciones de plantas de proceso.

A pesar de la iniciación bastante lenta que se ha observado, las turbinas de bomba centrífuga para la recuperación de potencia han logrado niveles respetables en las instalaciones de plantas de proceso, que se extienden hasta mediados de la década de 1950. Las aplicaciones logradas incluyen unidades motrices para los servicios siguiente: ventiladores para torres de enfriamiento, compresor reciprocante para reciclaje, bombas de circulación para soluciones de tratamientos de gases, como único medio de propulsión y en tándem con una turbina de vapor o un equipo auxiliar de motor, bombas de material de carga para unidades de refinería con unidad motriz auxiliar y generadores eléctricos de flotador en línea.

En general, las experiencias iniciales se relacionaron con pequeños caballajes, servicios no esenciales o de reserva, utilizando unidades motrices individuales a caballajes plenos. La tendencia actual se encamina de manera cada vez más marcada hacia el empleo de menos impulsores de mayor tamaño en servicios esenciales, sobre todo cuando se abastecen caballajes parciales, pero no de reserva. Si la planta se basa en propulsores eléctricos y la economía de la estructura de velocidad, las cargas de demanda, etc., lo permiten, el uso de las unidades de recuperación de potencia que mueven eléctricamente un generador en flotación con la línea han encontrado difusión cada vez mayor. En general, la experiencia de funcionamiento en relación con la seguridad, la facilidad de servicio y de mantenimiento, ha demostrado que las unidades son comparables con las bombas centrífugas y, por ende, han motivado una mayor aceptación, incluso como unidades motrices en unidades de grandes potencias o caballajes para equipos de servicios esenciales. En la figura 24-41 se incluye una ilustración de los límites industriales.

Comportamiento hidráulico El comportamiento hidráulico básico de las bombas centrífugas que funcionan como unidades de recuperación de potencia (turbinas) no es muy diferente de las bombas centrífugas y sigue el mismo tipo de leyes de afinidad en gamas angostas. En las figuras 24-42 y 24-43 se muestran curvas comunes generalizadas. Nótese, sobre todo, que tanto el esfuerzo de rotación como el de caballaje se hacen negativos (adoptan valores que indican consumo de potencia) cuando la carga y la capacidad quedan dentro de una gama más o menos amplia, que representa por lo menos las condiciones de arranque y detención, y también parte de la carga. Se observará, asimismo, que incluso cuando la carga es del orden de 125% del diseño, la velocidad (rpm) al torque igual que cero para esta unidad, no sobrepasa aproximadamente 130 a 150% del valor de diseño.

Las pruebas efectuadas para poner en funcionamiento bombas centrífugas como turbinas hidráulicas, a lo largo de la gama de carga-capacidad-velocidad, demuestran que una buena bomba centrífuga trabaja casi siempre muy bien como turbina hidráulica eficiente. Tomando en cuenta algunas consideraciones teóricas, se puede afirmar que, a la misma velocidad,

$$H_t = H_p/e_h^2 \qquad (24\text{-}22)$$

$$Q_t = Q_p/e_h \qquad (24\text{-}23)$$

$$n_{st} = n_{sp}e_h \qquad (24\text{-}24)$$

en donde H = carga total en el punto de mayor eficiencia
Q = capacidad
n_s = velocidad específica
e_h = eficiencia hidráulica, considerada como la misma para la turbina y la bomba
t, p = subíndices que denotan turbina y bomba respectivamente.

Puesto que jamás se llega a conocer el valor exacto de la **eficiencia hidráulica** e_h, $\sqrt{e}$ se toma como una aproximación, en que e es la eficiencia bruta de bomba (caballaje hidráulico/caballaje de frenado). Por lo común, las eficiencias de los diseños de bomba que funcionan como turbina son del orden de 5 a 10 puntos de eficiencia menores que las de las bombas a su máximo punto de eficiencia.

COMPORTAMIENTO DE OPERACIÓN

Tomando en cuenta que el flujo queda detenido, pero que la cubierta de la turbina está llena de líquido, se infiere por intuición que, para hacer girar la rueda o el impulsor en cualquier dirección es preciso aplicar cierta potencia. Conforme aumenta el flujo a partir de la condición de ausencia de circulación, la velocidad del fluido a través del impulsor se acerca de manera gradual a la velocidad que imparte la suficiente energía a dicho impulsor no sólo para vencer la fricción interna, sino también para permitir cierta salida neta de potencia para el consumo; habitualmente, este punto ocurre, aproximadamente, entre el 30 y el 40% del flujo o la capacidad de diseño. Como sucede con la unidad motriz de turbina, la máquina aumenta de velocidad hasta que

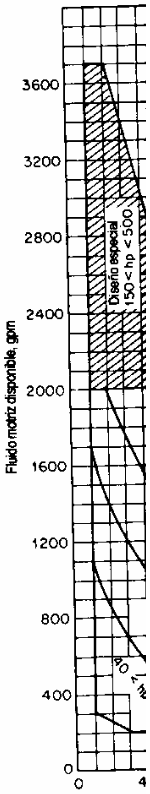


FIG. 24-41 Campos
se aplican entre los sig
a 3000 psig manométr
motriz, 200 a 4000 gal
basa en una velocidad
para otros fluidos, mul
cífica, para obtener la
drada en megapascale
minuto en metros cúbi
vertir caballos de pote

la carga impuesta a
igual que la potenc
cia. Al igual que e
curva característic
específica de carga
aplicaciones, la ca
mayor parte de un
varía sólo al grad
tuberías de entrada
Por lo tanto, en úl
un sistema diferen
límite de flujo defi
caballaje límite. E
carga del 100% qu

ıdencia actual se enca-
empleo de menos im-
es, sobre todo cuando
ıserva. Si la planta se
la estructura de velo-
el uso de las unidades
camente un generador
ın cada vez mayor. En
elación con la seguri-
o, ha demostrado que
entrífugas y, por ende,
mo unidades motrices
para equipos de servi-
una ilustración de los

ımiento hidráulico bá-
ımo unidades de recu-
nte de las bombas cen-
ad en gamas angostas.
s comunes generaliza-
le rotación como el de
ıe indican consumo de
ın dentro de una gama
ıos las condiciones de
ıga. Se observará, asi-
n de 125% del diseño,
esta unidad, no sobre-
: diseño.
ıamiento bombas cen-
: la gama de carga-ca-
bomba centrífuga tra-
hidráulica eficiente.
eóricas, se puede afir-

(24-22)
(24-23)
(24-24)

eficiencia

la como la misma para

ı bomba

ıxacto de la **eficiencia**
ción, en que *e* es la efi-
caballaje de frenado).
bomba que funcionan
eficiencia menores que
ıcia.

ÓN

ıo, pero que la cubierta
ıor intuición que, para
ır dirección es preciso
ujo a partir de la condi-
del fluido a través del
locidad que imparte la
a vencer la fricción in-
ıeta de potencia para el
ıroximadamente, entre
ıo. Como sucede con la
de velocidad hasta que

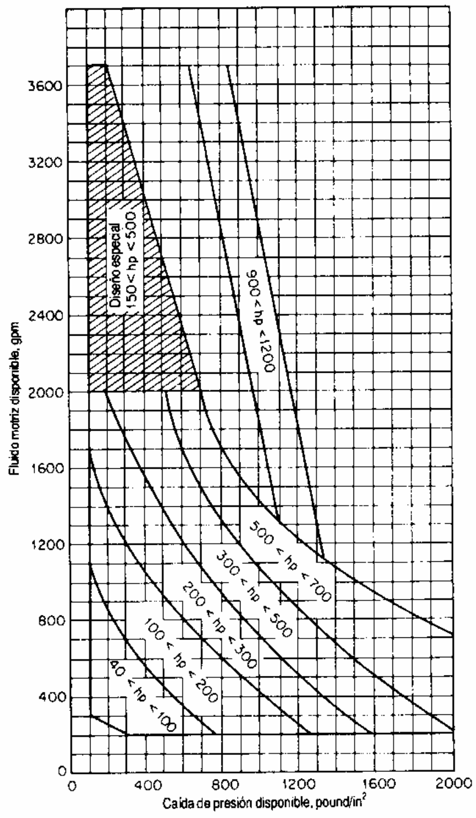


FIG. 24-41 Campos de aplicación de turbinas de bomba centrífuga. Las curvas se aplican entre los siguientes límites mínimo y máximo: presión de entrada, 100 a 3000 psig manométrica diferencial de presión, 100 a 2800 psig, flujo del fluido motriz, 200 a 4000 gal/min; potencia en hp, 50 a 3000. La potencia de la curva se basa en una velocidad de 3600 rpm y fluido de una gravedad específica de 1.0; para otros fluidos, multiplíquese la potencia hp de la curva por la gravedad específica, para obtener la potencia real. Para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.89×10^{-3}; para convertir galones por minuto en metros cúbicos por minuto, multiplíquese por 3.79×10^{-3}; y para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457.

la carga impuesta al acoplamiento del eje por la unidad impulsada es igual que la potencia recibida del impulsor de recuperación de potencia. Al igual que en una bomba, la unidad de recuperación recorre su curva característica y busca un punto en que se satisface su relación específica de carga-capacidad-velocidad de potencia. En casi todas las aplicaciones, la carga disponible para la unidad, que se compone en su mayor parte de una diferencia de presión estática, es casi constante y varía sólo al grado en que se alteran las pérdidas por fricción en las tuberías de entrada y salida en función del flujo que pasa por la unidad. Por lo tanto, en última instancia, la unidad actúa como un orificio en un sistema diferencial relativamente fijo, lo que significa que tiene un límite de flujo definido y produce también un esfuerzo de torsión y un caballaje límite. Esto se observará con claridad si se sigue la curva de carga del 100% que se ilustra en la figura 24-42.

Características de funcionamiento En la figura 24-45 se presenta el funcionamiento de la unidad de recuperación que **opera como único transmisor** (Fig. 24-44). Suponiendo que a la carga disponible se suministra más líquido en la unidad de recuperación de potencia que el que se necesita para generar el caballaje requerido por la bomba, la unidad de la turbina se acelerará para manejar dicho líquido y, al mismo tiempo, la velocidad de la bomba se elevará. Durante este aumento de velocidad, la turbina genera mayor caballaje que la bomba debe absorber, mientras se mantenga con la nueva velocidad. Por último, se llega a un punto de caballaje que está en equilibrio con la unidad impulsada, pero es probable que el valor rpm sea diferente al de diseño. Si es necesario controlar la velocidad de la unidad impulsora o motriz, el empleo de un estrangulamiento de cierta porción de la capacidad disponible en una válvula de desviación para la unidad permite que ésta satisfaga su relación de caballaje-capacidad-velocidad al valor deseado de rpm. Se presenta un problema similar cuando la capacidad de que dispone la unidad es menor que la que se requiere a la carga disponible y el valor de diseño de rpm. En tal caso, la unidad perderá la velocidad y se debe intentar reducir la carga y coincidir con su familia de curvas de carga-capacidad-velocidad. En este caso, el control de velocidad se logra estrangulando la presión disponible, de tal modo que la unidad sólo se enfrente a la porción de carga-capacidad-velocidad al valor deseado de rpm.

El funcionamiento de la unidad de recuperación de potencia que **opera con una unidad motriz de reemplazamiento** (Fig. 24-46) se ilustra en la figura 24-47; en la ilustración se indican valores de porcentaje específicos; pero las características generales y las formas de la curva son comunes. Se debe observar que el patrón de flujo, la selección del equipo y el diseño del mismo han producido un patrón de sistema relativamente inflexible, que revelan las curvas, en donde **1**) excepción hecha de un solo punto, la unidad de recuperación necesita siempre una desviación de flujo o el estrangulamiento de la presión de entrada (véase la curva más baja), y **2**) la salida de caballaje de la unidad de recuperación se reduce en cualquier punto alejado del diseño (véase la curva de diferencia de caballaje) que, en combinación con las características de las turbinas de vapor, da la extraña curva de flujo de vapor de estrangulación (la segunda de arriba hacia abajo en la Fig. 24-47).

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Respecto de la obtención de las curvas que aparecen en las figuras 24-45 y 24-47, se tiene un cálculo del llamado **punto de equilibrio**, en el cual el flujo y las rpm necesarias para la unidad de recuperación son iguales que las que proporciona la bomba. Si la turbina de recuperación es el único medio de transmisión (como sucede para la bomba de apoyo de la Fig. 24-44), tanto la velocidad como el caballaje de frenado de la turbina de recuperación y su bomba impulsada deberán ser iguales en el llamado punto de equilibrio o balance. Si se tiene un impulsor de reemplazamiento y la unidad de recuperación dispone de la cantidad de flujo adecuada proveniente de la bomba que impulsa, como sucede en el caso de la que aparece en la figura 24-46, entonces, la velocidad y la capacidad deben ser iguales en este punto de equilibrio.

Ejemplo 2 El diagrama que se muestra en la figura 24-44 y las unidades reales proporcionadas (Figs. 24-48 y 24-49) se utilizarán para fines de ilustración. Puesto que en este caso se tiene la unidad de recuperación como único medio de transmisión, el punto de equilibrio se determina gracias a la velocidad y potencia.

Para fines de ilustración, supóngase un flujo de 8.71 m^3/min (2300 gal/min) que pasa por la torre. La carga máxima de que dispone la turbina de recuperación se calculó en 604 m (1982 ft); este valor tiene un error ligero cuando se desvía parte del flujo, ya que las pérdidas por fricción en la entrada y la salida de la unidad de recuperación cambiarán. Primero se supondrá que la bomba de apoyo se ajusta a 3.03 m^3/min (800 gal/min) y a un funcionamiento de 3900 rpm mientras que la bomba de semiapoyo está a 5.68 m^3/min (1500 gal/min) para obtener un flujo total de 8.7 m^3/min (2300 gal/min). A 3.03 m^3/min (800 gal/min) y 3900

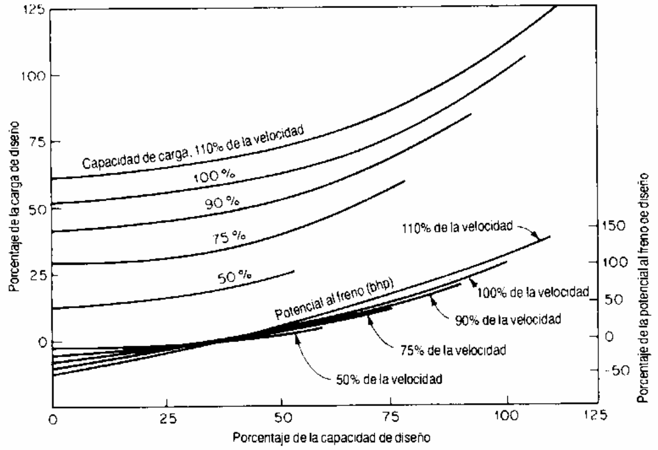


FIG. 24-42 Curvas generalizadas que muestran el comportamiento hidráulico de las bombas centrífugas que operan como turbinas de recuperación de potencia.

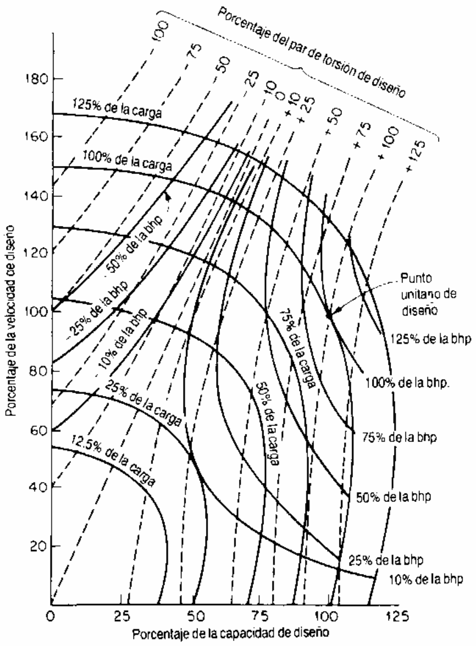


FIG. 24-43 Curvas generalizadas para bombas centrífugas que funcionan como turbinas de recuperación de potencia.

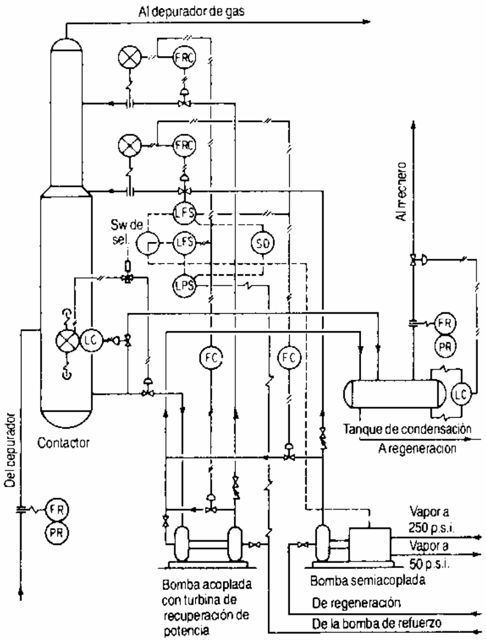


FIG. 24-44 Diagrama de flujo de una unidad de recuperación de potencia que funciona como única unidad motriz.

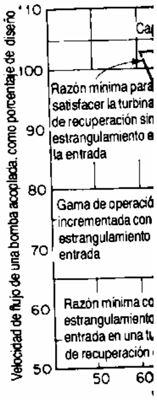


FIG. 24-45 Rendim

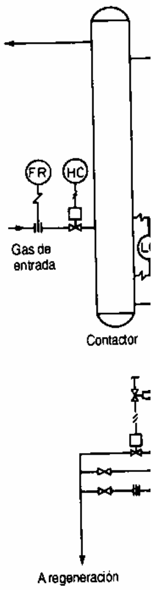


FIG. 24-46 Diagr potencia, que opera

rpm, la carga dispon
ser mayor que la car
especifica en la figu
correspondiente a la
Ahora, a 3900 rp
y la potencia o cab

turbinas

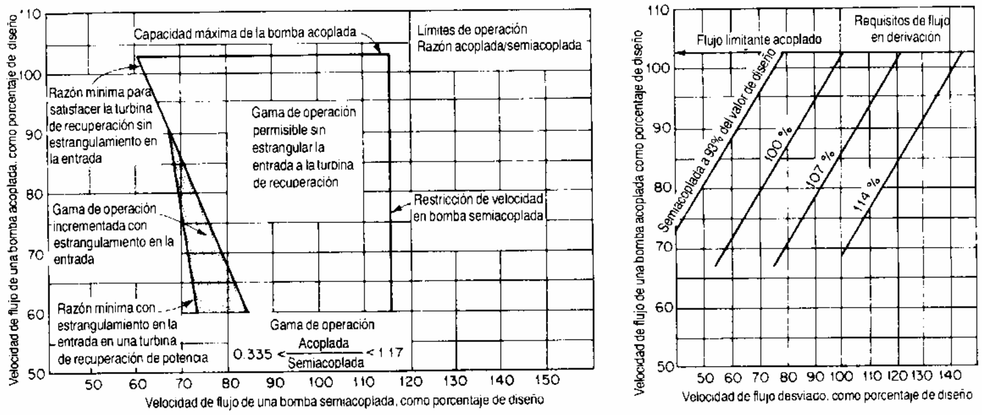
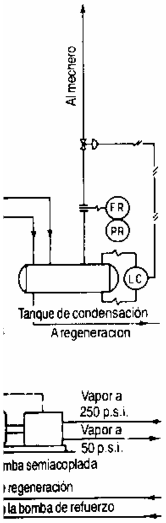


FIG. 24-45 Rendimiento de una unidad de recuperación de potencia que opera como única unidad motriz.



ıperación de potencia que

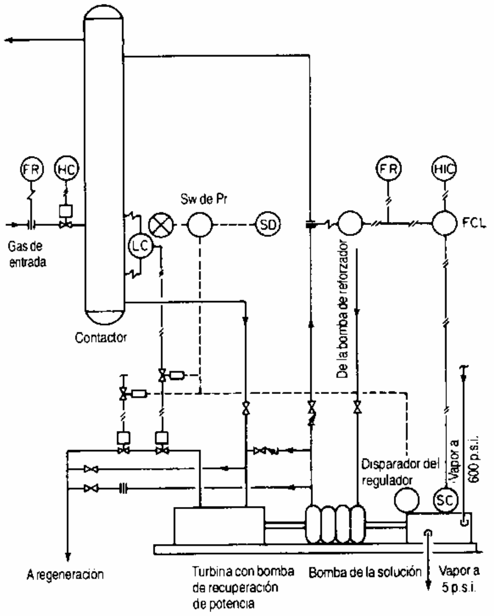


FIG. 24-46 Diagrama de flujo de un sistema con turbina de recuperación de potencia, que opera con una unidad motriz de reemplazo.

rpm, la carga disponible de la bomba de apoyo se lee en la curva. Este valor debe ser mayor que la carga requerida, y el exceso se representa gráficamente como se especifica en la figura 24-50. También se toma la lectura del caballaje de frenado correspondiente a la bomba de apoyo.

Ahora, a 3900 rpm y a una carga de 604 m (1982 ft), se lee el flujo requerido y la potencia o caballaje de frenado generado por la turbina de recuperación. Puesto que el caballaje de la bomba acoplada y la turbina de recuperación no son exactamente idénticos, todo este proceso se repite a otra velocidad con los 3.03 m (800 gal/min). La diferencia en el caballaje de frenado entre la bomba de apoyo y la turbina de recuperación se representa gráficamente, entonces, en función de la velocidad para estos dos puntos, y luego se traza una línea que los una. En el punto en que esta línea cruza la recta de caballaje de frenado de diferencia cero, se determina el punto de equilibrio a 8.71 m^3/min (2300 gal/min), a través de la torre y 3.03 m^3/min (800 gal/min) por la bomba de apoyo.

Este mismo procedimiento se puede utilizar con otros flujos de bomba para obtener una serie de curvas de punto de equilibrio como las que se presentan en la figura 24-51. A partir de este tipo de curvas se puede establecer el máximo de la bomba de apoyo a cualquier flujo de salida total de torre, y la combinación de esto con la curva de rendimiento de la bomba de semiapoyo da como resultado el diagrama de la figura 24-45. El flujo de desviación (by pass) que se representa gráficamente en la figura 24-45 se obtiene sumando los flujos simultáneos de la bomba de apoyo y la de semiapoyo y restando el flujo de la turbina-bomba de recuperación necesaria para obtener el punto de equilibrio al valor de flujo de la bomba de apoyo.

Bases de diseño Es evidente que el punto de equilibrio se determina siempre a través de las características de potencia y rpm de la unidad impulsada, como se detectan en el acoplamiento mediante el eje de la turbina-bomba de recuperación de potencia. Si la unidad impulsada, por ejemplo un generador eléctrico de flotación puede absorber sencillamente cualquier porción o todo el caballaje generado, quizá no sea necesario recurrir a un control de capacidad y al estrangulamiento de la presión. Cuando una unidad de caballaje variable y control de velocidad, como, por ejemplo, un motor eléctrico o una turbina de vapor proporciona un medio auxiliar en tándem o un propulsor de reemplazamiento, estas unidades mantienen constantes las rpm y desarrollan el caballaje suficiente para permitir que la turbina-bomba de recuperación de potencia satisfaga su curva de carga-capacidad prácticamente con cualquier velocidad de flujo.

Lo que se debe tomar en consideración son las **características combinadas de la unidad**, y éstas son las que se deben evaluar en la serie completa de operación, así como en las condiciones de arranque. El consumo de potencia, hasta casi el 40% de la salida indicada por diseño, durante el arranque y el aumento gradual hasta alcanzar la velocidad estipulada, así como el hecho de que, en cualquier condición de carga relativamente fija, la velocidad máxima a un torque de cero es, aproximadamente, 140% del valor de diseño, son aspectos que ya se habían subrayado con anterioridad. Por supuesto, éstos tienen un significado especial durante el arranque de la unidad o cuando se apaga, y son conceptos que no deben pasarse por alto. Cuando no se efectúa un análisis de sistema completo, con frecuencia se llega a un diseño de

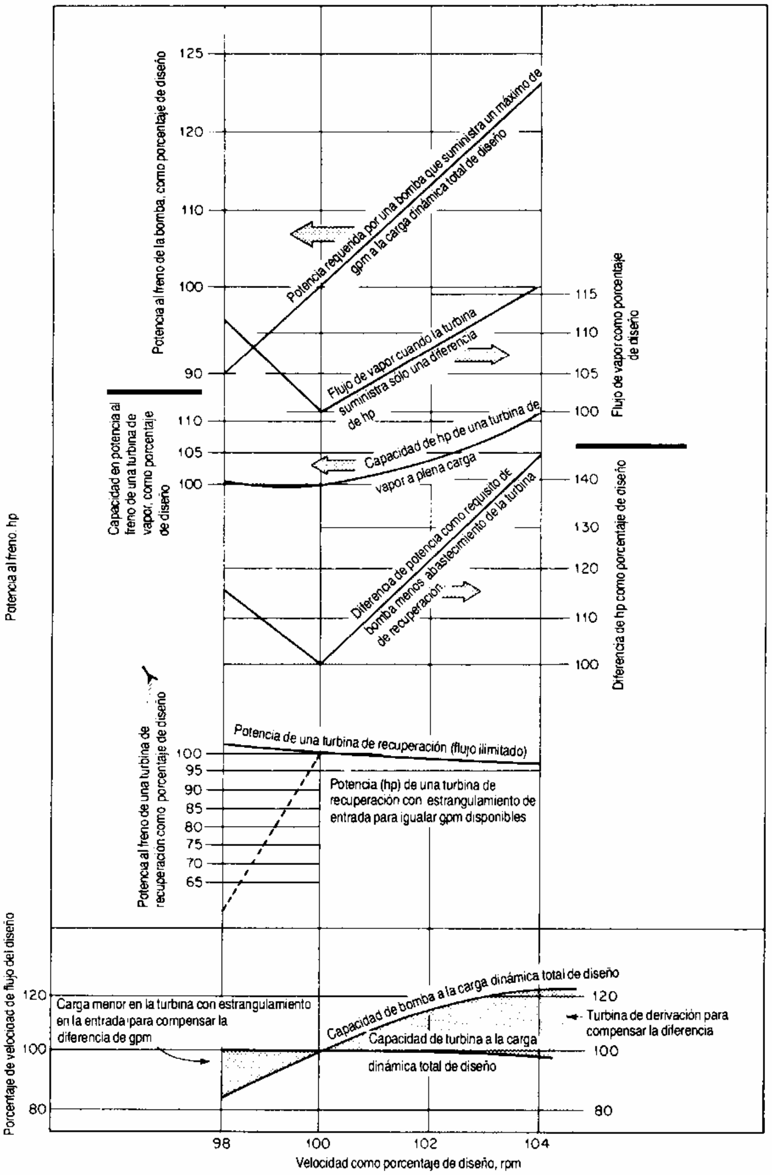


FIG. 24-47 Rendimiento de una turbina de recuperación de potencia con una unidad motriz de reemplazo.

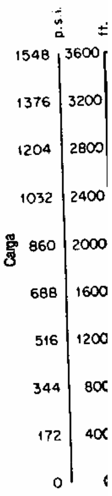


FIG. 24-48 C
opera como unid
de potencia en l

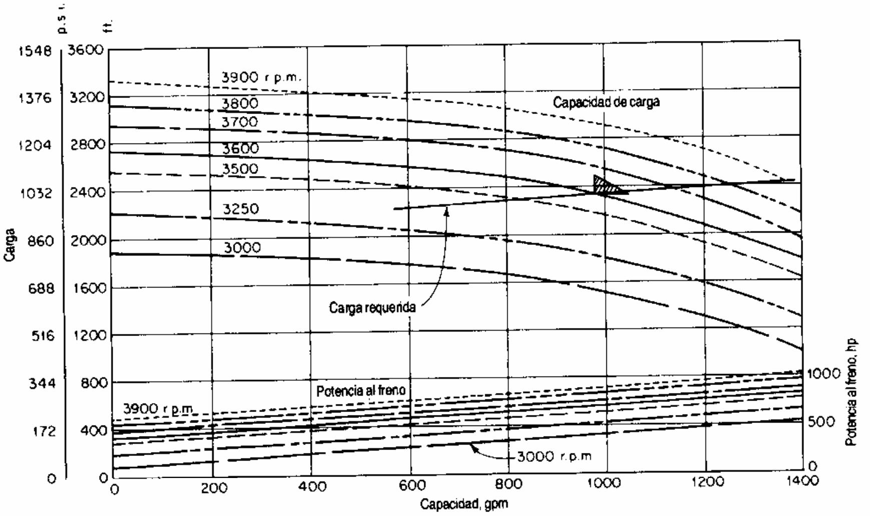


FIG. 24-48 Características de carga, potencia y capacidad de bombas acopladas conectadas en tándem, con turbina de recuperación de potencia que opera como unidad motriz única. Para convertir galones por minuto en metros cúbicos por minuto, multiplíquese por 3.79×10^{-3}; para convertir caballos de potencia en kilowatts, multiplíquese por 0.7457; y para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.89×10^{-3}.

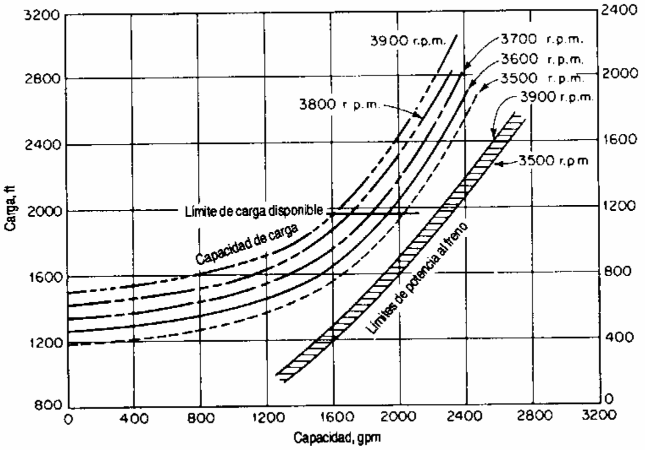


FIG. 24-49 Características de carga, potencia y capacidad de una turbina de recuperación, que opera como única unidad motriz de una bomba acoplada. Si la capacidad total de las bombas acopladas y semiacopladas exceden los valores indicados por el "límite de carga disponible", se debe utilizar una derivación. La carga neta de una bomba de recuperación a 8.71 m^3/min (2300 gal/min) se calcula como sigue:

Torre	957 lbf/in^2	6.598 MN/m^2
Tanque de condensación (flash)	−75	−0.517
Tubería de succión (62.4 lb/ft^3)		
Pérdida por fricción	−11.8	−0.081
Elevación	+ 2.8	+0.019
Tubería de descarga (57.8 lb/ft^3)		
Pérdida por fricción	−8.8	−0.061
Elevación	−5.6	−0.038
Neto =	859 lb/ft^2	5.923 MN/m^2

NOTA: Para convertir galones por minuto en metros cúbicos por minuto, multiplíquese por 3.79×10^{-3}; para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.7457; y para convertir libras-fuerza por pulgada cuadrada en megapascales, multiplíquese por 6.89×10^{-3}.

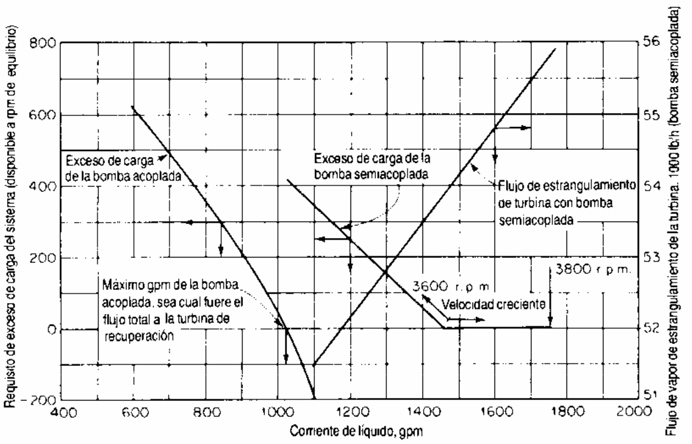


FIG. 24-50 Exceso de carga que desarrollan bombas acopladas y semiacopladas y flujo de estrangulamiento de vapor para una turbina con bomba semiacoplada. Para convertir galones por minuto en metros cúbicos por minuto, multiplíquese por 0.00379; para convertir libras por hora en kilogramos por segundo, multiplíquese por 1.260×10^{-4}.

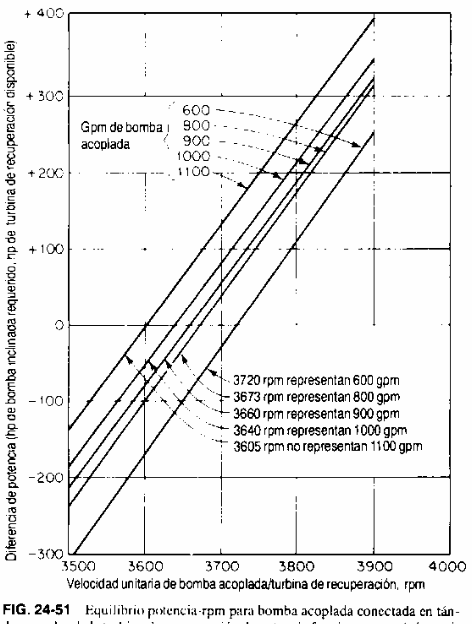


FIG. 24-51 Equilibrio potencia-rpm para bomba acoplada conectada en tándem, en donde la turbina de recuperación de potencia funciona como única unidad motriz. Las diferencias de potencia se calculan basándose en los requisitos de exceso de carga como los del ejemplo usual ilustrado en la figura 24-50. Para convertir galones por minuto en metros cúbicos por hora, multiplíquese por 0.2271; para convertir caballos de potencia (hp) en kilowatts, multiplíquese por 0.746.

proceso que, cuando se instala, resulta ser una verdadera trampa para el buen funcionamiento.

Cuando se toman en cuenta las ventajas de diseños competitivos para sistemas hidráulicos de recuperación de potencia, se tiene casi siempre una prima de inversión que se debe pagar para asegurar la **flexibilidad de funcionamiento**, que se ilustra en la figura 24-45. Esto adopta la forma de bombas de capacidad reducida e impulsores de turbina de vapor adicionales, así como cierta pérdida en la recuperación de potencia, que se deben a la desviación o el estrangulamiento efectuados incluso en el punto de diseño. Si se desea minimizar la inversión, quizá valga la pena estudiar un sistema de diseño más riguroso para la recuperación plena de potencia con un solo auxiliar de turbina-bomba, como se ilustra en la figura 24-46. En este tipo de sistemas, el único fluido disponible para la turbina de bomba es el que proporciona la bomba que impulsa y no se dispone de otra bomba independiente con impulsor auxiliar para el arranque. El personal operacional observará inmediatamente que este género de sistemas es relativamente inflexible y difícil de manejar (Fig. 24-47). En consecuencia, mientras que el sistema rigurosamente diseñado tiene una inversión mínima y una mayor recuperación de potencia, quizá no sea el más conveniente si se prevé un funcionamiento alejado del punto de diseño, puesto que sólo en este punto es donde no se requiere la desviación o el estrangulamiento. Además, es obvio que los requisitos máximos de vapor se pueden fijar en una condición de carga parcial, en lugar de hacerlo en las condiciones del diseño o con una sobrecarga.

Mientras que los ejemplos antes citados se refieren a aplicaciones con bombas centrífugas, el mismo análisis se realiza para bombas reciprocantes, compresores reciprocantes u otras máquinas rotatorias, como ventiladores de torres de enfriamiento.

CARACTERÍSTICAS DE INSTALACIÓN

Además de realizar un analisis del sistema, hay otros detalles o ciertas peculiaridades de las unidades que se deben tener en cuenta con respecto a:

1. Vaporización, condensación o cavitación
2. Volúmenes del fluido
3. Controles de la corriente de proceso

4. Control de ve
5. Arranque y sc
6. Característica
cuperada para gener
Fluidos disipabl
se instalan básandos
pérdida de presión
en tambores de bala
sión. Las dimension
sangría desde los tan
de la turbina-bomba
de dar margen a cie
En general, la evo
la cubierta misma d
correspondiente (co
nunca ha estado en
las pruebas de camp
es demasiado rápid
líquido. No obstant
lanceo y la línea de
esta línea se puede
Del mismo modo, l
pueden taponarse c
estática; esto provo
del tambor de bala
en funcionamiento.
Hay otro peligro
generalmente en la
debe a que una bom
condensación susta
representada por la
trica en la entrada p
por el diseño, hacie
te su velocidad.
Parece ser que ta
to del propulsor po
tación o de tipo fi
carga neta positiva
es aconsejable real
diferencial de pre
proporciona un me
lida es quizá mejo
sellos mecánicos,
deben ser adecuad
se cierra la válvula
Volúmenes de f
alizan instalacione
absorbedor. En la
do como su densid
Aunque normalm
sensibilidad del pu
tomar en cuenta el
lo adecuado que p
controles y las co
sis de sistema com
Controles de p
bina-bomba se reg
de abastecimiento
del depósito hará
ciendo con ello la
si el nivel de líqui
completo, de mod
plena disponible.
cuentra a su máxi
si el nivel sigue a
mismo. Un funcio
a una situación e
derivación en tor

4. Control de velocidad
5. Arranque y sobrecapacidad
6. Características del sistema eléctrico, si se utiliza la potencia recuperada para generar electricidad

Fluidos disipables por vaporización Muchas turbinas-bomba se instalan basándose en corriente de líquidos saturados con gases y la pérdida de presión puede causar problemas, siempre que esto ocurre en tambores de balanceo o sellos de laberinto para la reducción de presión. Las dimensiones de las tuberías que transportan las corrientes de sangría desde los tambores y los sellos del lado de baja presión (salida) de la turbina-bomba, se deben establecer en forma generosa, con el fin de dar margen a cierto grado de evolución del gas.

En general, la evolución o el desprendimiento del gas no es obvio en la cubierta misma de la turbina-bomba, ya que el caballaje adicional correspondiente (como se podría prever debido a la expansión del gas) nunca ha estado en plana evidencia en los informes que se ocupan de las pruebas de campo. Parece ser que el paso de líquidos por la cubierta es demasiado rápido para que se logre un equilibrio entre el vapor y el líquido. No obstante, el paso cortante más lento por el tambor de balanceo y la línea de retorno permite cierto desprendimiento de gas y esta línea se puede taponar debido a ello si su tamaño es insuficiente. Del mismo modo, los puntos altos de la cubierta de la turbina-bomba pueden taponarse con gases liberados, si la unidad se mantiene casi estática; esto provocará daños en la cámara de sellado, en las cámaras del tambor de balanceo, etc., cuando la unidad se ponga una vez más en funcionamiento.

Hay otro peligro potencial, debido a la vaporización que no ocurre generalmente en las instalaciones de plantas de proceso. El peligro se debe a que una bomba recibe sólo la carga de fluido y, si se produce una condensación sustancial en la tubería de entrada, la carga de fluido representada por las libras por pulgada cuadrada de presión manométrica en la entrada puede ser varias veces mayor que la carga estipulada por el diseño, haciendo que la unidad trate de incrementar enormemente su velocidad.

Parece ser que también un mínimo de presión de salida o de conducto del propulsor por debajo del cual pueden producirse daños por cavitación o de tipo físico (similares al NPSH, esto podría denominarse carga neta positiva de descarga, o NPDH). Por lo tanto, con frecuencia es aconsejable realizar el diseño utilizando en el proceso sólo parte del diferencial de presión total disponible para la turbina-bomba. Si se proporciona un medio de estrangulamiento, el estrangulamiento de salida es quizá mejor que el de entrada y, si se emplea cualquier tipo de sellos mecánicos, así como la brida de salida de la caja de la unidad, deben ser adecuadas para soportar la presión plena de entrada, cuando se cierra la válvula de estrangulamiento.

Volúmenes de fluido En muchas plantas de procesamiento se realizan instalaciones de este tipo que manejan *líquido rico* a partir de un absorbedor. En la mayor parte de los casos, tanto el volumen del líquido como su densidad cambian en su trayecto de la entrada a la salida. Aunque normalmente esos cambios no son sustanciales, debido a la sensibilidad del punto de equilibrio al volumen de flujo, es necesario tomar en cuenta el aumento volumétrico por absorción para verificar lo adecuado que pueda ser la unidad de turbina-bomba, así como los controles y las configuraciones de desviación como parte de un análisis de sistema completo.

Controles de proceso Si la entrada o la salida de líquido a la turbina-bomba se regula mediante un controlador de nivel en el depósito de abastecimiento del líquido, un nivel descendente de líquido dentro del depósito hará que dicho controlador estrangule una válvula, reduciendo con ello la presión diferencial disponible para la turbina; o bien, si el nivel de líquido se eleva, la válvula de control tiende a abrirse por completo, de modo que la turbina-bomba se enfrenta a toda su carga plena disponible. Puesto que en esta última condición la carga se encuentra a su máximo, no se tendrá un flujo de líquido por la bomba, y si el nivel sigue ascendiendo, el sistema quedará fuera del control del mismo. Un funcionamiento de esta índole conducirá inevitablemente a una situación en que el personal de operación deberá solicitar una derivación en torno a la turbina de bomba. Durante el arranque, con frecuencia es necesario tener una derivación de un punto corriente arriba de las válvulas de retención y bloqueo de descarga de la bomba impulsada, con la turbina de bomba asociada.

Velocidad El control de la velocidad puede alcanzar niveles críticos en este tipo de turbinas. Si se toman en cuenta las características ilustradas en la figura 24-47 (y las curvas en que se basan), un cambio de velocidad del 4%, de 98 a 102%, produce una variación del 33% en el flujo de la bomba, de 82 a 115% y, aproximadamente, un 22% de variación de caballaje, desde 118 hasta 100 y 122%. Un regulador mecánico para turbina de vapor clase A tipo NEMA tiene aproximadamente 10% de regulación en estado uniforme, de manera que, para el cambio de velocidad de caballaje del 22%, no se puede esperar una regulación de velocidad mejor que el 2%. Puesto que 4% es el cambio total de velocidad que se está tomando en cuenta, es obvio que existe un problema para regular la velocidad de la turbina de vapor. Ya que se supone que esta unidad servirá para sustentar la velocidad de la bomba, proporcionando el caballaje necesario para hacer que coincidan las curvas de la bomba y el sistema con la velocidad de flujo deseada, se detecta un problema verdaderamente grave. En este caso, el problema se resuelve eliminando el regulador de velocidad de la turbina de vapor, dejando sólo el escape para velocidades excesivas y sustituyendo una válvula de control activada directamente por medio de la medición de flujo de la bomba en línea con el abastecimiento de vapor que alimenta la turbina.

Contrariamente a lo que se observa en las turbinas de vapor, en donde el exceso de velocidad prolongado constituye siempre un problema, las turbinas de bomba que operan a la carga de diseño, tienden a un par cero a, aproximadamente, 130-140% de la velocidad estipulada por el diseño. Así, pues, quizá no sea necesario contar con la protección para velocidades excesivas si la turbina de bomba puede soportar entre 140 y 150% de la velocidad de diseño y es el único medio de transmisión. Cuando se utiliza un equipo auxiliar en la turbina de vapor, debe estar provisto del acostumbrado mecanismo de escape para velocidades excesivas.

Arranque y sobrecapacidad Desde el punto de vista del diseño y también del operacional, es importante recordar que las turbinas de bomba no sólo no generan potencia antes de alcanzar, aproximadamente, el 40% del valor de flujo estipulado en el diseño, sino que en realidad consumen potencia en cantidades decrecientes, conforme el flujo aumenta de 0 a 40%. Esto significa que deben conducirse hasta la velocidad de operación tan rápidamente como sea posible. Otra solución, que es más conveniente desde el punto de vista del funcionamiento y el mantenimiento, consiste en instalar un embrague de rueda libre o de sobremarcha (como el que fabrica la Marland Division of Zurn Industries, Inc., de La Grange, Illinois) entre la turbina y la bomba. Con este tipo de instalación, la bomba no es obligada a girar hasta que disponga del fluido necesario. Asimismo, no se conecta a la bomba hasta que corre con mayor rapidez que ella, momento en que comienza a producir potencia. Según esta configuración, la secuencia de arranque se selecciona de tal modo que la unidad de la turbina vaya de la velocidad cero hasta la de funcionamiento, recorriendo la curva cero-par de esfuerzo angular.

Por otro lado, la carga de diseño, la capacidad no cambia notablemente con la velocidad, de modo que, una vez que se sobrepasa el punto de diseño, la turbina de bomba actúa como una restricción en la línea. Puesto que la mayor parte de estas unidades opera basándose en un diferencial de presión relativamente fijo, tienden a actuar como un orificio para limitar el flujo y se deriva poco o ningún beneficio de cualquier exceso de capacidad en lo que respecta a la corriente de flujo disponible para la unidad en la instalación propiamente dicha.

Generación de energía eléctrica Cuando las turbinas de bomba se emplean para generar electricidad, las unidades se deben comunicar con redes eléctricamente bien establecidas, de un tamaño tal que la turbina no pueda alterar la frecuencia del sistema, sino que esté gobernada por dicha frecuencia y se convierta en una máquina de velocidad constante. El estrangulamiento de entrada o salida, así como la derivación (by pass) son aspectos que se deben utilizar en esta clase de instalaciones. En consecuencia, teniendo una velocidad fija y disponiendo

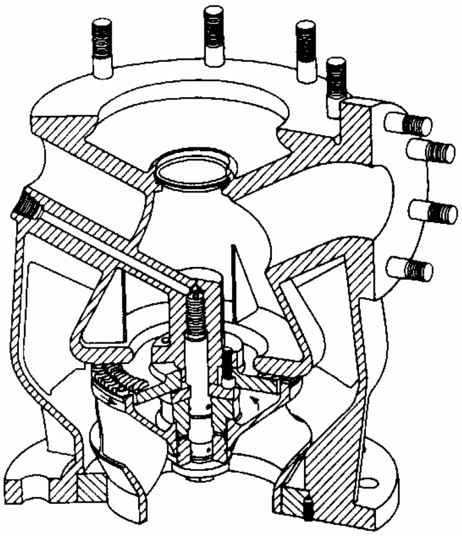


FIG. 24-52 Unidad de turbina y bomba de tipo integral o en una sola cubierta. (*Worthington Division, McGraw-Edison Co.*)

de una carga esencialmente constante debido al proceso, el diseño establecerá la cantidad máxima de potencia recuperable. Una vez instalada, la turbina-bomba no puede ser obligada a generar más potencia cuando dispone de un exceso de fluido, excepto si se hace un nuevo diseño de sus piezas internas. La porción eléctrica de este género de instalación es de tipo directo, los controles son sencillamente un estrangulamiento de entrada y una derivación (si es necesaria) para la turbina-bomba, y estos controles se operan sobre una gama dividida empleando el mismo control de nivel en el depósito de la fuente de líquido.

Unidades integrales Uno de los desarrollos relativamente recientes es la unidad de turbina-bomba integral o compacta, que se monta bajo una sola cubierta, posee un conducto de descarga común y está diseñada para montarse directamente en la tubería. En la figura 24-52 se ilustra un corte seccional de un diseño de esta índole. Es evidente que el empleo de estas unidades presupone la compatibilidad y la conveniencia de que la bomba descargue material que contamina al fluido de potencia que pasa por el propulsor de la turbina. Hasta ahora, esta unidad se ha aplicado poco en plantas de procesos, pero su sencillez, la independencia de las fuentes de alimentación normales y la facilidad con que se instala hacen que sean un candidato muy atractivo para situaciones en que el patrón de circulación del proceso puede adaptarse a sus características. Se ha propuesto para utilizarse en lugar de eductores o eyectores de líquidos, ya que manifiesta mayor eficiencia que esta unidad y, además, la corriente del fluido motriz de estrangulamiento hará que dicha corriente bombeada se apegue a los requisitos del punto de equilibrio.

EQUIPO MECÁNICO PARA LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA

TRANSMISIONES DE BANDA

Las bandas se utilizan para transmitir potencia de un eje a otro. Al mismo tiempo, se puede derivar una reducción o un incremento de velocidad.

Fundamentalmente, la transmisión de banda es un medio de impulsión por fricción. El factor más importante es la relación entre la tensión de la banda y la polea. Esto hace que se genere una presión y se desarrolle un torque de torsión en la polea.

Para condiciones estáticas, el coeficiente de fricción f sirve para definir los límites de la fuerza de fricción F_f disponibles para evitar una acción de pérdida de velocidad por deslizamiento entre las dos superficies planas, y la fuerza N que mantiene unidas ambas superficies.

$$F_f = fN \qquad (24\text{-}25)$$

Para velocidades de banda inferiores a 609 m/min (200 ft/min), se escribe una ecuación general que relaciona la tensión de banda con el coeficiente de fricción

$$T_1/T_2 = e^{f\theta} \qquad (24\text{-}26)$$

en la cual T_1 es la tensión en el lado tenso de la banda expresada en libras; T_2, la tensión del lado laxo de la banda, lb; e, la base de los logaritmos naturales (2.71828), f, el coeficiente de fricción entre la banda y la polea; y θ es el arco de contacto entre la banda y la polea, en radianes.

Para velocidades de banda que oscilan entre 914 a 1524 m/min (3000 a 5000 ft/min), el esfuerzo centrífugo dentro de la banda se convierte en una porción apreciable del esfuerzo total. La importancia de la tensión centrífuga T_c es que una porción de la tensión T_1 y T_2 se utiliza para obligar a la banda a seguir la trayectoria curva en torno a la polea. Por lo tanto, esta última tensión no se aprovecha para generar una presión entre la banda y la polea.

En seguida se da una ecuación para la tensión centrífuga:

$$T_c = \rho btV_2/300g \qquad (24\text{-}27)$$

en donde T_c se expresa en lb; ρ es la densidad de la banda, lb/in^3 (0.035 a 0.045); b, la anchura de banda, in; t el espesor de la banda, in; V, la velocidad de banda, ft/min, y g la constante gravitacional, 32.2 ft/s^2.

La tensión ejercida sobre el lado tenso de la banda no debe ser tan grande que sobrepase el valor de esfuerzo estipulado por el diseño, de 1.38 a 2.76 MN/m^2 (200 a 400 lb/in^2) para bandas de cuero.

Las bandas alcanzan una **velocidad crítica** que se observa cuando las poleas se mueven de un lado a otro o por sacudidas violentas en el lado laxo de la banda. Esta velocidad crítica es una función de las características geométricas de la instalación, las de banda y la tensión. Cuando se presente la condición crítica, se puede corregir cambiando estos parámetros.

La **capacidad de potencia** de una banda se calcula basándose en los siguientes datos:

A 183 m/min (600 ft/min) se deben emplear 1.2 hp/in de anchura de banda.

A 1828 m/min (6000 ft/min) se deben emplear 8.9 hp/in de anchura de banda.

Bandas en V La acción de cuña de una banda en V sobre las ranuras de la polea aumenta la carga de contacto. Por lo tanto, la fricción de las bandas en V es de dos a tres veces el valor de las bandas planas, lo cual genera una transmisión de potencia proporcionalmente mayor. Además, las bandas en V utilizan diámetros de polea más pequeños que las bandas planas para el mismo valor nominal de potencia.

roceso, el diseño es-
rable. Una vez insta-
enerar más potencia
si se hace un nuevo
ca de este género de
sencillamente un es-
es necesaria) para la
e una gama dividida
ósito de la fuente de

s relativamente re-
o compacta, que se
de descarga común y
tubería. En la figura
e esta índole. Es evi-
la compatibilidad y
rial que contamina al
turbina. Hasta ahora,
cesos, pero su senci-
lación normales y la
didato muy atractivo
n del proceso puede
ra utilizarse en lugar
fiesta mayor eficien-
ido motriz de estran-
e apegue a los requi-

ovecha para generar

centrífuga:

(24-27)

l de la banda, lb/in^3
espesor de la banda,
stante gravitacional,

anda no debe ser tan
lado por el diseño, de
s de cuero.
e se observa cuando
didas violentas en el
na función de las ca-
e banda y la tensión.
corregir cambiando

cula basándose en los

2 hp/in de anchura de

8.9 hp/in de anchura

a en V sobre las ranu-
o tanto, la fricción de
las bandas planas, lo
rcionalmente mayor.
polea más pequeños
ial de potencia.

La capacidad de transporte de carga T_1 de una banda en V varía entre 15.9 y 181.4 kg (35 y 400 lb).

La razón de velocidad teórica entre la transmisión y el equipo impulsado es esencialmente proporcional al diámetro de la polea, tanto para bandas planas como para bandas en V. Sin embargo, debido a la pérdida de velocidad y al corrimiento, la razón de velocidad real no es constante. La pérdida de velocidad entre la polea y las bandas puede llegar a ser del orden del 2% en el caso de bandas planas, pero es casi cero en las bandas en V. El corrimiento se debe a la elongación de la banda bajo tensión, y esto genera una mayor velocidad de banda en el lado impulsor en comparación al lado laxo.

Se utilizan conos ajustables para obtener diámetros de polea variables y, con ello, es factible asegurar velocidades ajustables con transmisiones de banda en V.

TRANSMISIONES DE CADENA

Las cadenas de rodillos de acero y las cadenas de dientes invertidos se clasifican como cadenas de transmisión de potencia. La cadena de rodillos es una serie en que se alternan enlaces de rodillos ensamblados y enlaces de espiga, en los cuales los rodillos giran libremente. La cadena puede ser una sola hilada que contiene una hilera de enlaces de rodillo, o bien, puede tratarse de varias hiladas con más de una hilera. La cadena y los dientes eliminan el deslizamiento que se observa con frecuencia cuando se emplean transmisiones de banda. También pueden transportar cargas mucho mayores. La reducción de velocidad es exactamente igual que la relación del número de dientes en la transmisión y los dientes impulsados. La mayor parte de las transmisiones de cadena corren con velocidades de 1828 m/min (6000 ft/min). Los esfuerzos de tracción ascienden a 444.8 kN/cadena (100 000 lb/cadena).

TRANSMISIONES DE ENGRANAJE

Los dientes engranados que se forman con cortadores especiales proporcionan un medio de propulsión más compacto que las transmisiones de banda o de cadena. Además, funcionan con velocidades mayores y con potencias más elevadas. Los engranajes más comunes son los cilíndricos. Conforme aumentan las velocidades del engranaje, la fricción incrementa el calor liberado, debido al contacto de deslizamiento entre los dientes del engranaje, por lo cual se deben usar perfiles especiales de dientes. Estos perfiles especiales, por ejemplo, el cicloidal, proporcionan una acción de rodamiento para reducir la fricción al mínimo. No obstante, los engranajes y los ejes se deben alinear y espaciar con una precisión extrema. Otro perfil, el engranaje involuto, no proporciona la misma calidad de acción de rodamiento que el cicloidal y se registra cierta pérdida de velocidad entre los dientes. Sin embargo, el perfil involuto no es tan sensible a la alineación del eje o al espaciamiento de los engranajes.

Los engranajes helicoidales se conforman mediante cortadoras que producen un ángulo que permite que varios dientes se engranen simultáneamente.

Los engranajes de diente angular tienen dos hélices de ángulos opuestos sobre el mismo engrane. Esto elimina el empuje axial de una sola hélice.

Engranajes planetarios Esta clase de engranaje consta de tres conjuntos de engranajes. Un piñón o engranaje solar se engrana con dos o más engranajes planetarios y, a su vez, éstos giran dentro de otro interno. Los engranajes planetarios se conectan a un eje y el engranaje solar a otro. Este sistema es compacto y logra una gran reducción de velocidades en un espacio limitado. También hacen posible el diseño de un eje de entrada y salida sobre la misma línea central.

Engranajes cónicos Éstos se utilizan con mayor frecuencia para transmisiones de 90°; sin embargo, hay otros ángulos a los que se pueden utilizar. La aplicación más común es la propulsión de una bomba vertical con una transmisión horizontal.

Engranajes helicoidales Las reducciones de velocidad comprendidas en el intervalo de 500 a 1, se obtienen por medio de engranajes helicoidales. La superficie de contacto de la rosca sobre el tornillo sinfín se desliza a lo largo de los dientes del engranaje. Este tipo de engranaje asegura eficiencias un poco menores que las que se obtienen con engranajes de dientes cónicos de precisión. Asimismo, la eliminación de calor representa un problema, y esto restringe el empleo de los engranajes helicoidales a aplicaciones de baja velocidad. Los ángulos de hélice amplios en los dientes del engranaje generan mayores eficiencias. El engranaje se puede impulsar por medio del tornillo sinfín o mediante los dientes del engranaje. Esta clase de engranaje puede ser continua. Así, pues, el torque de torsión del engranaje no hará que gire el tornillo sinfín.

El tornillo sinfín puede tener una o más roscas. Una revolución del mismo hace que avance el diente del engranaje en proporción directa con la cantidad de pasos del tornillo. La razón entre la velocidad y la reducción es igual que la cantidad total de dientes de engrane del tornillo sinfín, dividido por el número de roscas del mismo.

TRANSMISIONES DE VELOCIDAD VARIABLE

Toda máquina tiene una velocidad óptima con la que alcanza su más alta eficiencia. Dentro de la misma máquina, esta velocidad óptima puede diferir para diversas circunstancias o productos que maneja, y dicha velocidad óptima rara vez se puede predeterminar con exactitud. Los cambios de velocidad son, a menudo, necesarios mientras la máquina está funcionando.

Un tipo mecánico de transmisión de velocidad variable es el llamado engranaje PIV, que emplea una transmisión de cadena y queda totalmente encerrada bajo una cubierta. Esta transmisión de cadena transmite potencia del eje de entrada al de salida. En la figura 24-53 se muestra un ejemplo usual.

Al hacer girar la rueda manual o volante, se mueven las palancas de control dentro y fuera de los pivotes. Esto cambia el diámetro de las ruedas opuestas y proporciona una transmisión sin deslizamiento, con una velocidad continuamente variable. Todo el ensamblaje de los en-

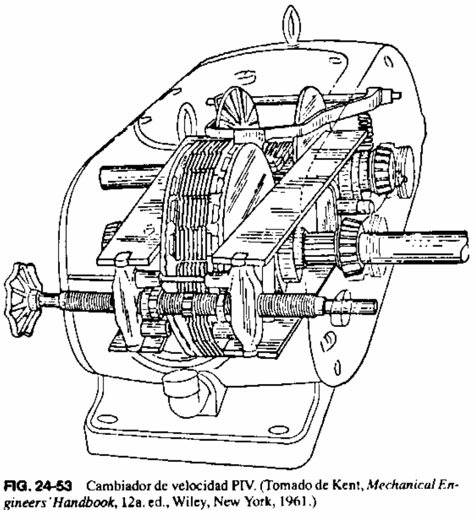


FIG. 24-53 Cambiador de velocidad PIV. (Tomado de Kent, *Mechanical Engineers' Handbook*, 12a. ed., Wiley, New York, 1961.)

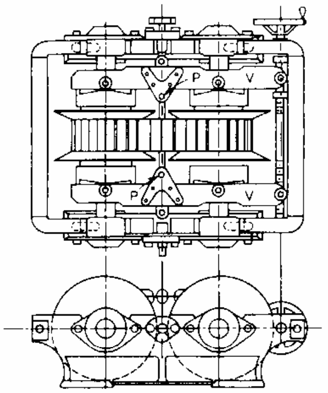


FIG. 24-54 Transmisión de velocidad variable, Reeves. (Tomado de Kent, *Mechanical Engineers' Handbook*, 12a. ed., Wiley, New York, 1961.)

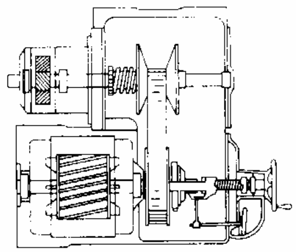


FIG. 24-55 Combinación de transmisión motriz y velocidad variable. (Reeves Pulley Co.; tomado de Kent, *Mechanical Engineers' Handbook*, 12a. ed., Wiley, New York, 1961.)

granajes está bajo una misma cubierta y funciona en un baño de aceite. Este dispositivo permite relaciones de velocidad de 2 a 1 hasta 6 a 1.

Poleas de paso variable La transmisión Reeves de velocidad variable (Fig. 24-54) tiene un límite de capacidad hasta de 74.6 kW (100 hp). Cuenta con dos pares de discos en forma de conos que se montan sobre ejes ranurados. El volante se hace girar produciendo un movimiento en las palancas que giran en torno a *P*. Esto hace que los discos de un par se acerquen y que los del otro par se alejen entre sí. Haciendo variar la distancia entre los discos, se obtiene cualquier relación de velocidad deseada.

La polea Reeves Vari-Speed, que se muestra en la figura 24-55, utiliza una banda V para transmitir potencia. Se emplean dos discos cónicos en el dispositivo, uno de ellos es estacionario y el otro se desliza en sentido lateral. El ensamblaje completo se monta sobre un eje de motor estándar. Cuando el voltaje gira, el motor y el ensamblaje del disco se mueven en uno y otro sentido. Cuando el motor está más cerca de la polea impulsada, se desarrolla la velocidad máxima. Las capacidades varían de 193 W a 11.2 kW ($^1/_8$ a 15 hp), a 1800 rpm de velocidad del motor, con relaciones de velocidad hasta de 4 a 1.

La transmisión Vari-Pitch es un dispositivo con banda V, que cuenta con una o dos poleas diseñadas de tal manera que las ranuras se logran ajustar a un diámetro de paso mayor o menor. Esto aumenta o reduce la velocidad del eje impulsado. La capacidad oscila entre 746 W y 93.2 kW (1 y 125 hp) y más.

Existen otras transmisiones mecánicas de velocidad variable que operan primordialmente basándose en el principio del cambio de paso de un disco de banda en V.

Transmisiones hidráulicas de velocidad variable El tipo hidrostático utiliza una bomba de desplazamiento variable. Esta clase de máquina emplea también un motor hidráulico de desplazamiento constante o variable.

En este género de transmisión, el eje de entrada se impulsa con una velocidad constante por medio de un motor eléctrico o cualquier otro primotor o motor primario. La velocidad del eje de salida varía y el torque nominal de rotación se transmite a lo largo de la gama de velocidades correspondiente.

En el tipo hidrostático, el aceite se bombea mediante un pistón que regula a otro en el lado exterior. El pistón de salida coloca a su vez una junta universal u otro dispositivo que regula la velocidad.

El tipo hidrodinámico de transmisión hidráulica de velocidad variable emplea la acción de turbina del aceite para transmitir la potencia. En una de estas clases, como la que aparece en la figura 24-56, se tienen dos rotores con aletas radiales rectas que forman un anillo toroidal. También se cuenta con un impulsor conectado al motor de propulsión, que actúa como bomba y crea un vórtice de aceite que mueve al engranaje como si fuera una rueda de turbina. Este último se conecta a la máquina impulsada. La velocidad de salida se ajusta alternando la cantidad de aceite en el vórtice.

En el caso de la transmisión fluida controlada por palanca, como la que se ilustra en la figura 24-56, la cubierta de rotación va unida al impulsor, y almacena en forma centrífuga el aceite que no entra al vórtice. Esta clase de transmisión se emplea para aplicaciones entre 3.7 y 261 kW (5 y 350 hp).

La transmisión fluida controlada por bomba, emplea un depósito externo para almacenar el aceite. Para aumentar la velocidad, la pequeña bomba de aceite transfiere dicho fluido del depósito al vórtice. Cuando se desea reducir la velocidad, el aceite se desvía al depósito externo mediante una válvula, o bien, invirtiendo el movimiento de la bomba. La transmisión fluida controlada por bomba tiene aplicaciones en ventiladores y transmisiones de bomba centrífuga entre 74.6 kW y 1.49 MW (100 y 2000 hp).

En el diseño cerrado de transmisiones fluidas se utiliza una cubierta o un receptáculo estacionario. No se tienen orificios para regular el flujo de aceite en el vórtice ni tampoco una bomba para abastecer los rotores con este fluido. El aceite se distribuye centrífugamente a través

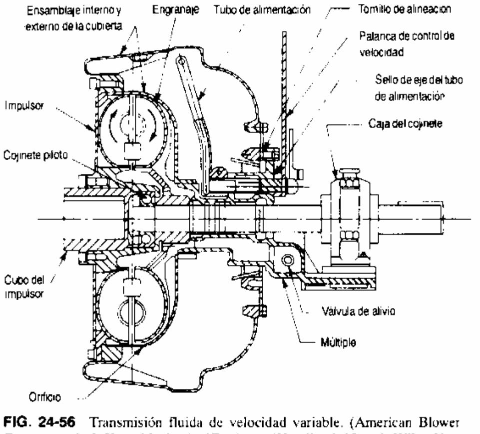


FIG. 24-56 Transmisión fluida de velocidad variable. (American Blower Corp.; tomado de Kent, *Mechanical Engineers' Handbook*, 12a. ed., Wiley, New York, 1961.)

del vórtice, y el tubo de control de velocidad se inserta entre las cajas que desnatan el anillo de aceite rotatorio, de acuerdo con su posición. El controlador de velocidad ajusta el nivel del aceite en el vórtice, así como en las cajas, y regula la velocidad de salida y el esfuerzo de rotación. Esta clase de transmisión fluida se diseña para aplicaciones del orden de 74.6 kW (100 hp) y más.

Control de velocidad eléctrico y electrónico Se dispone de una amplia variedad de métodos eléctricos para regular la velocidad. El más reciente consiste en el empleo de rectificadores de silicio para controlar la velocidad del motor. Otros métodos para motores de cc incluyen resistencias en serie, derivaciones de campo, dos motores en serie y control de campo. Para motores de ca se emplean cambios de frecuencia y voltaje para regular la velocidad, junto con dos devanados y polos consecuentes, resistencias secundarias, voltajes variables, control de campo y desplazamiento de escobillas (véase la subsección "Motores Eléctricos").

Convertidores hidráulicos del momento de torsión Estos convertidores generan una velocidad de salida que varía con los requisitos del par o momento de torsión. La relación de velocidad se controla automáticamente a través de dicho par. Para obtener un control preciso de la velocidad de salida, el convertidor de par se debe utilizar con una transmisión de velocidad variable, como, por ejemplo, un motor de combustión interna.

El convertidor hidráulico consiste simplemente en una bomba, una turbina y un estator de reacción (Fig. 24-57). La bomba actúa como si fuera centrífuga y suministra fluido hidráulico a una turbina, en la cual éste se desplaza radialmente hacia adentro. El fluido sale de la turbina a través de una serie de aletas de desviación hacia el miembro estacionario de reacción o estator, y luego entra una vez más a la bomba.

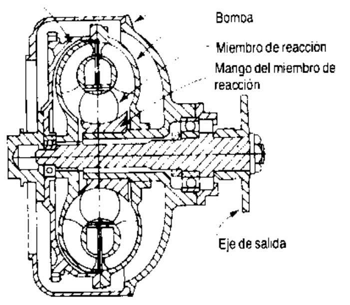


FIG. 24-57 Convertidor de par de torsión hidráulico de tres elementos y etapa sencilla. (Tomado de Kent, *Mechanical Engineers' Handbook*, 12a. ed., Wiley, New York, 1961.)

ACOPLAMIENTOS MECÁNICOS

Las conexiones entre el eje de la transmisión y la máquina impulsada debe ser capaz de transmitir el par o momento de torsión.

Los acoplamientos sólidos consisten en bridas rígidas sobre cada eje, sujetas firmemente con pernos para formar un eje continuo. Cuando el motor y el equipo impulsado funcionan con la misma velocidad, estos acoplamientos se pueden utilizar con toda eficacia. Los cojinetes se pueden eliminar pero las fallas de alineación en el eje generan esfuerzos importantes en el mismo, sobrecargas en los cojinetes y vibraciones. Si se tiene una alineación deficiente, es preciso emplear acoplamientos flexibles.

Acoplamientos flexibles Es difícil lograr una alineación exacta entre el motor y el eje impulsado. Para compensar la falta de alineación del eje, con frecuencia se utilizan acoplamientos flexibles (véanse las Figs. 24-58 a 24-60).

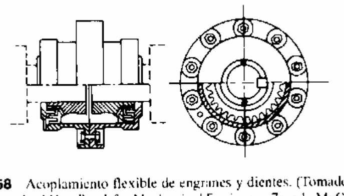


FIG. 24-58 Acoplamiento flexible de engranes y dientes. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

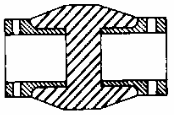


FIG. 24-59 Acoplamiento flexible de hule. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

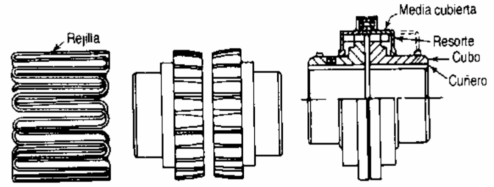


FIG. 24-60 Acoplamiento Falk Steelflex. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

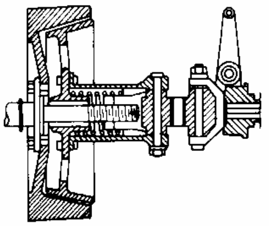


FIG. 24-61 Embrague cónico. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

Los acoplamientos flexibles se emplean también para reducir el efecto de las variaciones en el par de torsión. Se emplean bujes o incrustaciones de hule para asegurar la flexibilidad de torsión deseada.

Para compensar las fallas de alineación, se utiliza un diseño que permite una acción de deslizamiento entre las partes del acoplamiento que se engrana. Esta acción de deslizamiento crea fricción y limita la falla de alineación permisible en ejes de alta velocidad.

Para ejes de alta velocidad se emplean acoplamientos flexibles de tipo de engranaje (véase la Fig. 24-58). En esta clase de aditamento se unen con pernos dos mitades de acoplamiento. Cada mitad contiene un engranaje interno que se engrana con los dientes de las bridas del eje. Con velocidades de operación, cualquier alineación deficiente se corrige mediante un movimiento entre los dientes del engranaje que se intercalan. Estos acoplamientos se llenan con aceite lubricante o grasa, para evitar daños debido al movimiento de los dientes con las velocidades de operación.

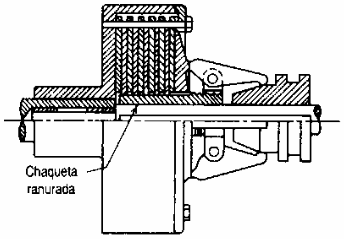


FIG. 24-62 Embrague de varios discos. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

Acoplamientos desconectables En ocasiones se desea conectar o desconectar la transmisión del equipo impulsado mientras están en funcionamiento. Hay varios tipos de embragues de fricción que permiten enganchar o desenganchar los ejes con velocidades de funcionamiento (véanse las Figs. 24-61 y 24-62).

Para evitar la rotación inversa, se acostumbra emplear un embrague de sobremarcha (Fig. 24-63). Esta clase de embrague utiliza clavijas ovales entre los conductos, que se atoran cuando el par de rotación se ejecuta en una dirección y se sueltan del engarce cuando se invierte nuevamente la rotación.

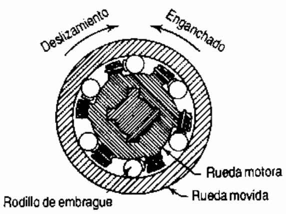


FIG. 24-63 Embrague de sobremarcha. (Tomado de Vallance y Doughtie, *Design of Machine Members*, 3a. ed., McGraw-Hill, New York, 1951.)

Hay otra clase de acoplamientos de desconexión que emplean un tubo de tela ahulada. Cuando éste se infla, entra en contacto con un anillo que se conecta al eje de salida. Mediante un simple acto de inflar o desinflar el tubo, la unidad motriz puede desconectar o conectar la máquina impulsada durante su funcionamiento.

COJINETES

Los manuales, los libros de texto y los catálogos de los fabricantes proporcionan los datos de diseño necesarios para que un ingeniero pueda seleccionar los cojinetes adecuados para diversas aplicaciones. No obstante, el usuario promedio no selecciona los cojinetes y su principal preocupación se limita a entender los tipos básicos de cojinetes y sus ventajas y desventajas relativas.

Tipos de cojinetes Los cojinetes, llamados también chumaceras, se clasifican como de deslizamiento de baja valocidad, de alta velocidad y lubricados con aceite, y antifriccionantes. Estos últimos incluyen los de bolas y rodillos.

La velocidad entre los elementos de un cojinete con deslizamiento de baja velocidad es tan lenta, que no se forma una capa de aceite para separar las superficies deslizantes. La lubricación reduce la fricción estática y de deslizamiento que se limita más aún utilizando superficies cuidadosamente pulidas o agregando lubricantes (como grafito, talco o saponita) para llenar las cavidades de la superficie. Las características esenciales de esta clase de cojinetes son el desgaste lento de las superficies deslizantes y mayores tolerancias de máquina, con advertencias claras respecto del desgaste excesivo y pocos riesgos de daños repentinos desastrosos. La generación de calor es lo suficientemente baja para ser expulsada lejos de las superficies frotantes de las piezas de la máquina.

La capacidad de sustentación de carga de un cojinete de alta velocidad lubricado con aceite se debe al "desarrollo" de presión generada, porque la superficie en movimiento absorbe aceite a una región en donde el espesor de la capa de aceite disminuye para formar una cuña de aceite. Las cuñas de aceite en los cojinetes de muñón hacen que el eje no sea concéntrico con los mismos (véase la Fig. 24-64). En los cojinetes de empuje axial de tipo estacionario, esta cuña se obtiene maquinando una depresión ahusada en los collarines de empuje estacionarios. En el caso de cojinetes de empuje axial y cojín inclinado, como, por ejemplo los **Kingsbury**, el ángulo adoptado bajo la rotación forma la cuña de aceite.

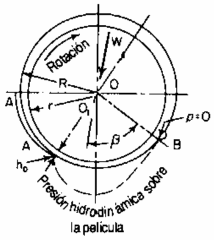


FIG. 24-64 Cojinete de muñón con lubricación perfecta. (Tomado de Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7a. ed., McGraw-Hill, New York, 1967.)

Los parámetros de diseño de distintas industrias difieren porque los cojinetes se deben configurar no sólo para soportar una carga, sino también para satisfacer otras condiciones en las cuales deben operar máquinas específicas. Por lo tanto, en el diseño de turbinas se prefieren tolerancias pequeñas para minimizar las fugas de vapor, mientras que en las máquinas sujetas a contaminación, como, por ejemplo, las que funcionan en zonas polvorientas, deben aumentarse tales tolerancias para permitir un flujo de aceite amplio y pasar partículas de polvo. Las locomotoras deben transmitir cargas de alta tracción con grandes cargas unitarias de cojinete para minimizar el peligro de daños, este tipo de cojinetes se ajusta a mano a los ejes y se deben tener bajo inspección continua.

Con velocidades nominales, los cojinetes que soportan cargas ligeras y que pueden disipar el calor de fricción por medio de la caja de cojinetes, sólo necesitan estar provistos del suficiente aceite para recuperar "las fugas". Las aceiteras de anillo, de mecha etc., se emplean para el reabastecimiento desde este depósito que, a su vez, recibe las fugas de terminales. Para velocidades bajas, se utilizan cojinetes con grasa. La pérdida de aceite en los bloques de grasa evita que el polvo se introduzca y abastece aceite de lubricación durante la acción de fusión provocada por el calor de fricción. Los cojinetes de alta velocidad se lubrican por flujo a presión para asegurar un abastecimiento suficiente para compensar las fugas y para mantener las temperaturas tanto del lubricante como del metal en las zonas del cojinete, así como para eliminar el calor que se conduce a lo largo del eje y la cubierta. Los materiales de gran conductividad para cojinetes se escogen a menudo para minimizar la formación de puntos calientes localizados. Los cojinetes que tienen un diseño y una lubricación adecuados seguirán funcionando durante muchos años sin necesidad de sustituirlos.

La capacidad de carga de un cojinete aumenta con la velocidad superficial, la viscosidad y el ángulo de cuña. La ecuación generaliza-

uperficie. Las carac-
n el desgaste lento de
de máquina, con ad-
o y pocos riesgos de
alor es lo suficiente-
ficies frotantes de las

ojinete de alta veloci-
de presión generada,
ceite a una región en
para formar una cuña
muñón hacen que el
a Fig. 24-64). En los
esta cuña se obtiene
rines de empuje esta-
ial y cojín inclinado,
ptado bajo la rotación

ecta. (Tomado de Bau-
, 7a. ed., McGraw-Hill,

s difieren porque los
rtar una carga, sino
cuales deben operar
turbinas se prefieren
vapor, mientras que
por ejemplo, las que
rse tales tolerancias
tículas de polvo. Las
ión con grandes car-
o de daños, este tipo
ener bajo inspección

soportan cargas lige-
medio de la caja de
iente aceite para re-
cha etc., se emplean
, a su vez, recibe las
tilizan cojinetes con
a evita que el polvo
ante la acción de fu-
tes de alta velocidad
bastecimiento sufi-
s temperaturas tanto
inete, así como para
e y la cubierta. Los
e escogen a menudo
localizados. Los co-
uados seguirán fun-
stituirlos.
ta con la velocidad
cuación generaliza-

da propuesta define una capacidad de soporte de carga de los cojinetes de muñón expresándola en términos de la relación del espesor mínimo de la capa de aceite, h, con la tolerancia del cojinete, c, y casi siempre se representa gráficamente para relaciones determinadas de longitud de cojinete L respecto al diámetro de cojinete d, como se indica en seguida:

$$h = ZN\, d^2/Pc \qquad (24\text{-}28)$$

en donde Z es la viscosidad en cP; P la presión media de cojinete (carga/Ld), y N un valor de rpm.

La potencia de fricción disipada en una película o capa de aceite es proporcional al espesor de la misma, la velocidad, la densidad y la longitud del cojinete. El aumento de temperatura t es proporcional al calor disipado dividido entre el producto del calor específico c_p del aceite y la cantidad de flujo del mismo. Las altas temperaturas del aceite reducen su viscosidad en cantidad suficiente para romper la película y, como resultado, cada diseño de cojinete tiene una capacidad máxima de soporte de carga, según Z, N y d/c.

Aunque las diferentes industrias emplean valores distintos de c/d, ZN/P y L/d, los cojinetes se diseñan siempre para asegurarse de que el espesor mínimo sea superior a un valor aceptable, y que el aumento de temperatura quede dentro de límites permisibles. Se encuentran comúnmente valores de c/d = 0.001 y L/d menores que la unidad, para compresores centrífugos y turbinas. Los valores más altos de c/d = 0.002 y L/d = 2 se emplean en máquinas de velocidad más lenta y, con menor frecuencia, en maquinarias de alta velocidad. Los valores de P varían, casi siempre, de 0.34 a 2.0 MN/m^2 (50 a 300 lb/in^2) y para condiciones especiales hasta de 3.79 MN/m^2 (550 lbf/in^2). Se obtienen valores superiores mediante el empleo de cojinetes inclinados, que favorecen el enfriamiento eficaz del aceite.

Las máquinas reciprocantes (cigüeñales y muñones de cigüeñales) tienen grandes cargas unitarias de cojinete [del orden de 12.41 MN/m^2 (1500 lb/in^2)] ya que, durante la porción de descarga del ciclo, fluye aceite de renuevo al cojinete y se desarrolla una presión conforme el aceite se expulsa. Por lo tanto, el aceite frío es el que soporta siempre la carga y los cojinetes son térmicamente estables.

El **movimiento circular del aceite** es un fenómeno de los cojinetes, que se produce en maquinarias de alta velocidad y con cojinetes verticales, y es resultado de tener cojinetes de cargas ligeras (es decir, valores elevados de ZN/P). Para un cojinete horizontal que soporta una carga vertical, esta acción se describe como sigue:

Si el eje comienza a girar (moviéndose en una trayectoria circular) en la dirección de rotación, reduciendo con ello el espesor de la capa de aceite, las presiones de cojinete resultantes elevarán el eje hasta que el componente vertical de la reacción de capa de aceite del cojinete sea menor que la carga del mismo. En esta etapa, el componente horizontal de la reacción de la capa de aceite, del cojinete obligará al eje a moverse hacia el centro del mismo, aumentando el espesor de la capa de aceite y permitiendo que el eje regrese a la posición inicial. En tales circunstancias, la acción de bombeo del eje desarrollará la suficiente energía para contrarrestar las pérdidas y el movimiento circular del eje dentro del cojinete persistirá. La frecuencia del movimiento circular es, aproximadamente, la mitad del valor de rpm del eje.

La amplitud del movimiento circular del eje duro (es decir, la velocidad crítica por encima de la velocidad de funcionamiento) se limita a la amplitud de dicho movimiento dentro del cojinete y es probable que su aparición pase inadvertida. La amplitud de dicho movimiento aumenta conforme la velocidad de funcionamiento se acerca al doble de la frecuencia crítica del rotor, momento en que ocurre la resonancia con amplitudes de vibración resultante agrandadas, que pueden llevar a fallas o fatiga.

Los casos leves de este fenómeno se han detenido cambiando la viscosidad del aceite, ya sea incrementando la temperatura del mismo o reduciendo su flujo, o bien, en algunos casos, haciendo exactamente lo contrario (esto es, reduciendo las temperaturas del aceite). Los casos más graves requieren que se reduzca la longitud del cojinete, para producir presiones medias más elevadas.

El tamaño de partículas abrasivas en el aceite o las irregularidades de la superficie determinan el mínimo práctico de espesor de la capa de aceite y puede generar presiones unitarias reducidas. Para evitar este fenómeno en tales condiciones, es preciso utilizar cojinetes de diseño especial, como, por ejemplo, los **cojinetes de segmentos o inclinados**, que cambian el contorno del cojinete y reducen la capacidad de sustentación del mismo conforme gira. Otra posibilidad consiste en que los pasajes de receptáculos del cojinete se diseñan de tal modo que cambie la distribución de presión para refrenar este tipo de acción giratoria.

Cojinetes de empuje Las cargas axiales reducidas se soportan por medio de un simple collarín de empuje en el eje que corre contra una superficie plana y paralela de un cojinete estacionario, en donde la lubricación hacia el centro fluye radialmente hacia afuera. Las superficies planas y paralelas evitan la formación de una cuña de aceite, limitando así este tipo de cojinete para cargas axiales bajas. La capacidad incrementada, que se obtiene por medio de varios collarines sobre un eje, no es proporcional a la cantidad de collarines empleados, ya que uno de ellos es el que generalmente soporta la mayor parte de la carga.

Se pueden grabar ranuras radiales en la superficie, para dejar que se forme una cuña y aumentar la capacidad de carga de un simple collarín de empuje. Las tolerancias de fabricación y los errores en el ángulo del chaflán pueden hacer que algunos segmentos del cojinete soporten más carga que los demás, con lo cual se afecta la capacidad de soporte de carga de este tipo de cojinete de empuje. Los cojinetes de empuje de cojín inclinado se desarrollaron para contrarrestar las limitaciones de los de cuña fija, que permiten que los cojines individuales se inclinen de tal manera que se distribuya la carga de un modo más uniforme entre los mismos.

Los cojinetes de empuje tienen las mismas limitaciones térmicas y de nivel mínimo de espesor de capa que los de chaqueta. Además, los cojines inclinados pueden deformarse bajo cargas, creando puntos de calentamiento, o bien, la acción de bombeo del collarín de empuje hace que la porción interna del cojinete de empuje se seque. Los cojinetes de cojines inclinados se prefieren para cojinetes de tipo axial para trabajos pesados. Este tipo de dispositivos se fabrican en varias compañías especializadas y también los producen casi todos los fabricantes de equipos para trabajos pesados, según el diseño básico desarrollado por Kingsbury en Estados Unidos y Michelle en Francia.

Cojinetes de bolas y rodillos Con frecuencia, estas unidades se denominan cojinetes antifriccionantes, ya que parece ser que un eje que gira sobre las bolas o rodillos rodantes carece de fricción. Su funcionamiento real no alcanza este estado ideal, como se explicará más adelante, en el caso de los cojinetes de bolas. Los cojinetes de rodillos, incluyendo las variedades de agujas y los ahusados, utilizan ecuaciones diferentes.

La máxima presión unitaria de contacto, $P_{máx}$ que resulta de una esfera de radio r, que soporte una carga F sobre una placa plana del mismo material que la esfera (módulo de elasticidad E) es

$$P_{máx} = 0.388\sqrt[3]{FE^2/r^2} \qquad (24\text{-}29)$$

y el esfuerzo es

$$S_{máx} = 0.31 P_{máx} \qquad (24\text{-}30)$$

Para asociar este esfuerzo con las propiedades de fatiga del material, se puede calcular la vida de un cojinete ideal para una carga supuesta. El tamaño relativo de las bolas adyacentes y su espaciamiento influye en la vida del cojinete de bolas. El efecto de estos parámetros se determina poniendo a prueba gran cantidad de cojinetes con una vida definida estadísticamente, de manera que una cantidad no mayor del 10% de los mismos falle con la vida de diseño escogida y menos del 50% falle a cinco veces más el valor de esa vida estipulada por el diseño. Algunos cojinetes pueden alcanzar vidas 20 a 30 veces mayores que lo que indica el diseño. Estas pruebas se realizan con la velocidad y la carga nominales.

La **capacidad de cojinete** de catálogo C se ajusta a las condiciones de servicio, multiplicando la carga real de operación R por varios factores, que son K_L, un factor de vida para corregir la vida de catálogo

con la vida requerida; K_S, un factor de velocidad para corregir la velocidad de catálogo con la velocidad requerida; K_A un factor de aplicación para corregir las posibilidades de choque y K_T, un factor de empuje axial para justificar la aplicación de la carga axial y la radial.

La ecuación resultante de estos factores se expresa como sigue:

$$C = K_A K_L K_S K_T R \tag{24-31}$$

en donde $K_L = \sqrt[3]{(\text{vida requerida})/(\text{velocidad de catálogo})}$

$K_S = \sqrt[3]{(\text{velocidad requerida})/(\text{velocidad de catálogo})}$

K_A = 1 para cargas uniformes, y aumenta a 3 para cojinetes de bolas o a 2 para cojinetes de rodillos, cuando se soportan cargas de choque extremas

K_T = 1, habitualmente, en las condiciones de carga de diseño, y es diferente para cada diseño de cojinete para diversas condiciones de carga radial de empuje.

Los cojinetes de diferentes fabricantes son intercambiables, debido a la estandarización dimensional, en lo que respecta a la anchura, el diámetro externo y el interno, en donde se tienen series clasificadas normalmente como ligeros, medianos y de trabajos pesados. Para asegurar la selección de cojinetes comparables, es necesario que los valores nominales se corrijan en función de las condiciones de operaciones comunes.

La fricción de los cojinetes se debe, en parte, a la fricción entre los elementos y los receptáculos (cuya función es mantener separados los elementos), pero, sobre todo, al movimiento ascendente que se debe a la impresión de los elementos cargados en los conductos. Para asegurar una lubricación eficaz de los cojinetes de baja velocidad, se recurre al rocío de aceite, flujo, rebosamiento o empaquetamiento con grasa. Al aumentar la velocidad, el calor generado por los elementos en movimiento dentro del lubricante adquiere un valor crítico y, en consecuencia, los sistemas de lubricación de los cojinetes de bolas para altas velocidades se diseñan de tal modo que proporcionen sólo la cantidad exacta de lubricante que se necesita; por lo común, el lubricante se aplica como rocío o neblina.

Debido a la facilidad con que se instalan y a su disponibilidad, los cojinetes de rodillos y bolas son muy populares entre fabricantes y usuarios. Entre las ventajas adicionales que ofrecen está el hecho de que pueden proporcionar el centrado y la ubicación precisos del eje con respecto a la cubierta, el agotamiento se mantiene a un mínimo y se logran torques de arranque bajos. Su principal desventaja, en comparación con los cojinetes de muñón, es que su vida tiene menor seguridad y hay un porcentaje determinado que falla con el tiempo.

SISTEMAS DE LUBRICACIÓN

La lubricación implica el simple llenado manual de los recipientes de aceite o los de grasa, o bien, la aplicación a presión de lubricante en los aditamentos, o bien, la lubricación automática de resumideros con aceiteras de anillo, cadenas o mesas. No obstante, los cojinetes de alta velocidad requieren sistemas más complejos, para asegurar un abastecimiento continuo de aceite limpio.

Las máquinas grandes requieren un enfriador de aceite para eliminar el calor generado en sus cojinetes; por lo común, el aceite se mantiene en un depósito y se bombea hasta el cojinete a través de enfriadores y filtros de aceite. La temperatura del aceite se controla para mantener la viscosidad constante, y la suficiente presión de aceite se conserva para asegurar un flujo uniforme por los orificios que conducen a los cojinetes pendientes desde los cojinetes hasta el depósito, y tienen dimensiones generosas para permitir el paso de la espuma que se produce junto con el aceite de retorno. Los aceites de lubricación se escogen de tal modo que produzcan un mínimo de espuma y, cuando ésta es excesiva, se emplean aditivos antiespumantes. Los sistemas de lubricación se deben limpiar por inundación o circulación de aceite antes de iniciar la operación, y después, se deben mantener limpios para evitar daños posteriores.

Los filtros de aceite se sitúan tan cerca de los cojinetes como sea posible y deben ser capaces de separar todas las partículas que sean grandes en comparación con el espesor mínimo de la capa de aceite. El **subfiltrado** hará que se rayen los cojinetes y esto puede causar daños más graves. El **sobrefiltrado** representa un riesgo de taponamiento en los filtros y éstos se pandean liberando repentinamente su contenido, o bien, detienen el paso libre del aceite.

Algunas máquinas producen partículas pequeñas (es decir, partículas de carbón en diesel), cuyo tamaño no es lo suficientemente grande para dañar al sistema de lubricación. No obstante, se considera buena práctica evitar su acumulación, para este fin, el microfiltro es muy eficaz y cuando se instala en una carrera lateral no se pondrán en peligro los cojinetes principales.

Para minimizar la condensación y la acumulación consecuente de humedad de la atmósfera o como producto de combustión, los sistemas de lubricación se mantienen a, aproximadamente, 71°C (60°F). Las centrífugas separan lodos, humedad y contaminantes más pesados que el petróleo, y se deben emplear a intervalos periódicos. Los filtros magnéticos separarán todas las impurezas imantadas.

Los **peligros** derivados de los sistemas de lubricación se clasifican en varias categorías, por ejemplo, fallas del sistema de lubricación propiamente dicho, fugas de aceite, producción de vapores y acarreo y acumulación de aceite.

A menos que la máquina se detenga inmediatamente, la falla en su sistema de lubricación causará daños en los cojinetes y en el eje. Para reducir este peligro, la mayor parte de los circuitos de lubricación están provistos de controles automáticos, para detener los impulsores de manera inmediata cuando disminuye la presión del aceite de lubricación.

Las fugas de aceite representan comúnmente un problema de limpieza y mantenimiento (para evitar que los empleados resbalen) y, cuando se escapa de piezas calientes, constituye un grave peligro de incendio. Las fugas de aceite se deben a **1**) conexiones de tubería, cojinetes y cajas de cojinetes inadecuadas o defectuosas; **2**) líneas de retorno de aceite de tamaños insuficientes, para permitir que la espuma se acumule y salga de los cojinetes, y **3**) algunas partes rotatorias, como eliminadores de polvo y aceite, que inducen un flujo de aire que sopla la espuma o las gotitas para expulsarlas de las cajas de los cojinetes.

El espacio de aire que queda encima de los depósitos del aceite de lubricación siempre contiene vapor y gotitas de dicho material. Algunas máquinas reciprocantes, como motores diesel y de gas, enfrían el lado inferior de los pistones con aceite lubricante y la acción de las partes oscilantes aumenta la cantidad de gotitas de aceite en el tanque de aceite, o cárter. Conviene seguir las recomendaciones de los fabricantes para minimizar los riesgos de explosiones de dicho depósito, que se deben a la ignición de las gotitas de aceite.

Los depósitos de aceite de la turbina y de los compresores axiales o centrífugos son cerrados y se ventilan a la atmósfera y, por lo común, no se consideran como riesgos en potencia. No obstante, cuando los sistemas de aceite de lubricación o de sellado de un compresor o una turbina están en contacto con hidrocarburos, el depósito de aceite se ventila hacia un lugar seguro.

Las gotitas de aceite arrastradas por el aire de descarga de los compresores de aire reciprocantes con lubricación, se depositan en las tuberías de descarga o se acumulan en puntos bajos, así como en los tanques de recepción del aire. Las altas temperaturas de descarga carbonizan el aceite, creando depósitos de carbón considerables. Se han producido explosiones en depósitos de aceite y se han generado incendios en depósitos de carbón. Estos peligros se minimizan mediante un drenaje minucioso del sistema de descarga, el empleo de separadores de aceite y la selección adecuada de las etapas del compresor que limiten las temperaturas de descarga. Los lubricantes no inflamables y la utilización de compresores no lubricados elimina este riesgo, pero esto se logra a costos iniciales de operación superiores.

en mantener limpios
s cojinetes como sea
s partículas que sean
e la capa de aceite. El
› puede causar daños
› de taponamiento en
mente su contenido.
ias (es decir, partícu-
ficientemente grande
e, se considera buena
icrofiltro es muy efi-
e pondrán en peligro
ición consecuente de
ibustión, los sistemas
te, 71°C (60°F). Las
ntes más pesados que
riódicos. Los filtros
adas.
ricación se clasifican
a de lubricación pro-
vapores y acarreo y
amente, la falla en su
etes y en el eje. Para
s de lubricación están
os impulsores de ma-
aceite de lubricación.
un problema de lim-
pleados resbalen) y,
un grave peligro de
ciones de tubería, co-
osas; 2) líneas de re-
rmitir que la espuma
rtes rotatorias, como
lujo de aire que sopla
jas de los cojinetes.
pósitos del aceite de
dicho material. Algu-
el y de gas, enfrían el
te y la acción de las
de aceite en el tanque
laciones de los fabri-
s de dicho depósito.
ompresores axiales o
fera y, por lo común,
obstante, cuando los
un compresor o una
depósito de aceite se
descarga de los com-
e depositan en las tu-
, así como en los tan-
raturas de descarga
ón considerables. Se
te y se han generado
s se minimizan me-
rga, el empleo de se-
etapas del compresor
bricantes no inflama-
s elimina este riesgo.
superiores.

Sección 25

Factores económicos de los procesos

F. A. Holland, D.Sc., Ph.D., *Chairman, Department of Chemical Engineering, University of Salford, Salford, England; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers; Fellow, Institution of Chemical Engineers, London. (Editor de la sección)*

F. A. Watson, M.Sc., *Senior Lecturer, Department of Chemical Engineering, University of Salford; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers; Fellow, Institution of Chemical Engineers, London*

J. K. Wilkinson, M.Sc., *Senior Lecturer, Department of Chemical Engineering, University of Salford; Partner in Salchem Associates, Consulting Engineers; Fellow, Institution of Chemical Engineers, London*

NOMENCLATURA

INVERSIÓN Y RENTABILIDAD

Costos, utilidades y flujos de efectivo anuales . . . 25-5
Gráficas de aportación y de punto de equilibrio . . . 25-7
Costos de capital . . . 25-7
Depreciación . . . 25-8
Medidas tradicionales de la rentabilidad . . . 25-9
Valor del dinero en el tiempo . . . 25-10
Ejemplo 1: Costo capitalizado del equipo . . . 25-12
Mediciones modernas de la rentabilidad . . . 25-12
Ejemplo 2: Valor presente neto para diferentes métodos de depreciación . . . 25-13
Análisis de sensibilidad . . . 25-19
Ejemplo 3: Análisis de sensibilidad . . . 25-19
Curvas de aprendizaje . . . 25-20
Ejemplo 4: Cálculo del costo promedio de unidades adicionales . . . 25-22
Riesgo e incertidumbre . . . 25-22
Ejemplo 5: Cálculo de probabilidades . . . 25-24
Ejemplo 6: Cálculo de la probabilidad de satisfacer la demanda de ventas . . . 25-25
Ejemplo 7: Cálculo de la probabilidad de ventas . . . 25-25
Ejemplo 8: Cálculo de la probabilidad de desperfectos en el equipo . . . 25-25
Ejemplo 9: Cálculo de la probabilidad de fallas en la maquinaria . . . 25-25
Ejemplo 10: Curva de logística . . . 25-27
Ejemplo 11: Método paramétrico de análisis de riesgo . . . 25-29
Ejemplo 12: Valor esperado de la utilidad neta . . . 25-31
Ejemplo 13: Evaluación de las prioridades de inversión mediante cálculo de probabilidades . . . 25-32
Ejemplo 14: Cálculo de la probabilidad de que un programa de investigación y desarrollo llegue al punto de equilibrio . . . 25-33
Ejemplo 15: Curva de función de utilidad . . . 25-33
Inflación . . . 25-35
Ejemplo 16: Efecto de la inflación sobre el valor presente neto . . . 25-36
Ejemplo 17: Efecto del costo del combustible en la economía del proyecto . . . 25-40

CONTABILIDAD Y CONTROL DE COSTOS

Principios de contabilidad . . . 25-40
Financiamiento del activo con capital propio y deuda . . . 25-43
Datos comparativos de empresas . . . 25-48
Costo del capital . . . 25-49
Ejemplo 18: Costo del capital libre de riesgo . . . 25-50
Administración y contabilidad de costos . . . 25-51
Asignación de gastos indirectos . . . 25-51

Ejemplo 19: Gastos indirectos para dos productos diferentes 25-52
Valuación y control del inventario 25-52
Ejemplo 20: Cálculos del inventario 25-53
Capital de trabajo 25-55
Presupuestos y control de costos 25-58

CÁLCULO DE LOS COSTOS DE MANUFACTURA

Consideraciones generales 25-58
Un producto principal y subproductos 25-59
Dos productos principales 25-60
Ejemplo 21: Cálculo de las aportaciones a los ingresos por productos múltiples 25-60
Costos directos de manufactura 25-61
Costos indirectos de manufactura 25-61
Cálculos rápidos de costos de manufactura 25-62
Costo de manufactura como base para la fijación del precio del producto 25-62
Costos estándar para control presupuestario 25-63
Ejemplo 22: Variación en la mezcla de materiales directos 25-65
Análisis de las aportaciones 25-66
Valuación de la energía térmica recirculada 25-67

CÁLCULO DE LOS COSTOS DEL CAPITAL FIJO

Costo del capital total 25-68
Índices de costos 25-68
Tipos y exactitud de los cálculos 25-69
Cálculos rápidos 25-70
Cálculos mediante factores 25-70
Ejemplo 23: Cálculo del costo total instalado de una planta 25-73
Cálculo de las tuberías 25-78
Cálculo de instalación eléctrica e instrumentos 25-79
Cálculo de servicios auxiliares 25-80
Empleo de computadoras para cálculos de costos 25-81
Costos de puesta en marcha 25-82
Tiempo de construcción 25-82
Control del proyecto 25-82
Costos de construcción en otros países 25-84

Nomenclatura y u

Símbolo	
a	Constant
A	Ingreso o el subí
A_A	Deducció por de
A_D	Deprecia de imp
(ATR)	Relación la ecua
b	Constant
b_c	Desviaci
B	Constant
c	Constant
c	Costo (o produ
c_B	Costo de
c_D	Costo de una bo ecuaci
c_I	Costo de al com compi
c_L	Costo de produ
c^*	Costo es subín
C	Costo p
C_{CT}	Costo in
C_{DS}	Costo in desml
$(C_{EQ})_{DEL}$	Costo d
C_K	Costo c por la
C_L	Costo d depre
C_{RS}	Costo i
C_{RW}	Costo i de ag
C_{WS}	Costo i de ag
(CI)	Índice d (25-2
$(COP)_A$	Coefici bomb
(CR)	Relació (25-1
(CRR)	Relació del c (25-5
(CSR)	Relació por l
d	Consta
d	Símbol
(DR)	Relació (25-1
(DCFRR)	Tasa de efec
e	Consta
e	Base d
exp (a)	Funció
(EMIP)	Period defi
f_{AF}	Factor $i[(1$

*El signo $ indica d

.... 25-66
.... 25-67

PITAL FIJO

.... 25-68
.... 25-68
.... 25-69
.... 25-70
.... 25-70

.... 25-73
.... 25-78
.... 25-79
.... 25-80
.... 25-81
.... 25-82
.... 25-82
.... 25-82
.... 25-84

Nomenclatura y unidades

Símbolo	Definición	Unidades
a	Constante empírica en ecuaciones generales	Diversas
A	Ingreso o gasto anual particularizado por el subíndice	\$*/año
A_A	Deducción anual de impuestos que no sea por depreciación de activo fijo	\$/año
A_D	Depreciación anual de activo fijo, deducible de impuestos	\$/año
(ATR)	Relación de rotación de activo, definida por la ecuación (25-131)	Adimensional
b	Constante empírica en ecuaciones generales	Diversas
b_c	Desviación de la capacidad presupuestada	Adimensional
B	Constante paramétrica en ecuación (25-204)	Adimensional
c	Constante empírica en ecuaciones generales	Diversas
c	Costo (o ingreso) por unidad de ventas o de producción particularizado por el subíndice	\$*/unidad
c_B	Costo del suministro básico de calor	\$/unidad
c_D	Costo de la energía térmica entregada por una bomba de calor, definido por la ecuación (25-240)	\$/GJ
c_I	Costo de energía de alta calidad suministrada al compresor de una bomba de calor de compresión de vapores	\$/GJ
c_L	Costo de mano de obra por unidad de producción	\$/hora
c^*	Costo estándar particularizado por el subíndice	\$/hora
C	Costo particularizado por el subíndice	\$
C_{CT}	Costo instalado de una torre de enfriamiento	\$
C_{DS}	Costo instalado de un sistema de agua desmineralizada	\$
$(C_{EQ})_{DEL}$	Costo del equipo entregado	\$
C_K	Costo capitalizado de un activo fijo definido por la ecuación (25-47)	\$
C_L	Costo de terrenos y otros activos no depreciables	\$
C_{RS}	Costo instalado de un sistema de refrigeración	\$
C_{RW}	Costo instalado de un sistema de suministro de agua de río	\$
C_{WS}	Costo instalado de un sistema de suavización de agua	\$
(CI)	Índice del costo utilizado en la ecuación (25-246)	Adimensional
$(COP)_A$	Coeficiente de rendimiento real de una bomba de calor	Adimensional
(CR)	Relación de capital definida por la ecuación (25-134)	Anual
(CRR)	Relación de rendimiento o tasa de retorno del capital, definida por la ecuación (25-56)	Anual
(CSR)	Relación entre aportación y ventas, definida por la ecuación (25-236)	Adimensional
d	Constante empírica en ecuaciones generales	Diversas
d	Símbolo que indica diferenciación	Adimensional
(DR)	Relación de deuda, definida por la ecuación (25-139)	Adimensional
(DCFRR)	Tasa de rendimiento o retorno con flujo de efectivo descontado	Anual^{-1}
e	Constante empírica en ecuaciones generales	Diversas
e	Base de los logaritmos naturales, 2.71828	Adimensional
$\exp(a)$	Función exponencial de a, e^a	Adimensional
(EMIP)	Periodo equivalente de inversión máxima, definido por la ecuación (25-55)	Anual
f_{AF}	Factor de valor futuro de una anualidad, $i[(1+i)^n - 1]^{-1}$	Adimensional
f_{AP}	Factor de valor presente de una anualidad, $f_{AF}(1+i)^n$	Adimensional
f_d	Factor de descuento, $(1+i)^{-n}$	Adimensional
f_i	Factor de interés compuesto, $(1+i)^n$	Adimensional
f_k	Factor de costo capitalizado, f_{AP}/i	Adimensional
f_p	Factor de costo de tubería, definido por la ecuación (25-249)	Adimensional
$f(x)$	Función de distribución de x con diversas definiciones	Adimensional
F	Valor futuro de una suma de dinero	\$
F_n	Suma de fd para los años 1 hasta n	Adimensional
i	Tasa de interés por periodo, por lo general anual; a menudo, el costo del capital	Adimensional
i_e	Tasa efectiva de interés, definida por la ecuación (25-111)	Adimensional
i_m	Tasa mínima de interés aceptable definida por la ecuación (25-107)	Adimensional
i_r	Tasa de interés del riesgo empresarial	Adimensional
i'	Tasa nominal anual de interés	Adimensional
I	Valor del inventario particularizado por el subíndice	\$
k_n	Constantes en la ecuación (25-81)	Diversas
K	Valor efectivo de la primera unidad de producción	\$/unidad, tiempo/unidad, etc.
$\ln(a)$	Logaritmo base e de a	Adimensional
$\log(a)$	Logaritmo base 10 de a	Adimensional
m	Número de periodos de intereses devengados por año	Adimensional
m	Número de unidades retiradas de inventario	Adimensional
(MSF)	Función de supervivencia medida, definida por la ecuación (25-106)	Adimensional
n	Número de años, unidades, etc.	Adimensional
N	Pendiente de la curva de aprendizaje definida por la ecuación (25-64)	Adimensional
N	Número de pedidos de inventario por año	Adimensional
(NPV)	Valor presente neto	\$
$p(x)$	Probabilidad de que la variable tenga el valor x	Adimensional
P	Valor presente de una suma de dinero	\$
P_a	Tiempo de producción trabajado	Hora
P_b	Producción presupuestada	Hora estándar
P_e	Eficiencia de producción, definida por la ecuación (25-216)	Adimensional
P_1	Grado de actividad de producción, definido por la ecuación (25-217)	Adimensional
P_s	Volumen real de producción	Hora estándar
P'_s	Valor en libros de un activo al final del año s'	\$
P_w	Tiempo presupuestado de trabajo	Hora
(PBP)	Periodo de recuperación, definido por la ecuación (25-30)	Año
(PM)	Margen de utilidad, definido por la ecuación (25-127)	Adimensional
(PSR)	Relación utilidad-ventas, definida por la ecuación (25-235)	Adimensional
q	Cantidad que define la escala de operación	Diversas
Q_D	Consumo térmico unitario requerido por el proceso	GJ/hora
r	Fracción del intervalo de la variable independiente	Adimensional
R	Volumen de producción	Unidades/año
R^*	Volumen estándar de producción	Unidades/año
R_B	Volumen de producción de equilibrio	Unidades/año

*El signo \$ indica dólares estadounidenses.

Nomenclatura y unidades (*Continúa*)

Símbolo	Definición	Unidades
R_0	Volumen de producción programado	Unidades/año
R_S	Volumen de ventas	Unidades/año
(ROA)	Rendimiento del activo, definido por la ecuación (25-129)	Adimensional
(ROE)	Rendimiento del capital propio, definido por la ecuación (25-130)	Adimensional
(ROI)	Rendimiento de la inversión, definido por la ecuación (25-128)	Adimensional
s	Número programado de años productivos	
s'	Número de años productivos a la fecha	
s^2	Desviación estándar de la muestra	Diversas
S	Valor de desecho de un activo depreciable	$
t	Tasa fraccional de impuesto pagadero sobre el ingreso ajustado	Adimensional
t_C	Tiempo requerido para construir la planta	Años
t_{St}	Tiempo requerido para poner en marcha la planta	Años
T	Variable auxiliar, definida por la ecuación (25-92)	Diversas
U	Tamaño del pedido de inventario	Unidades
V	Costo variable del pedido del inventario	$/unidad
W	Potencia aplicada en el eje de una bomba de calor	GJ/hora
x	Variable general	
$\bar{x}$	Valor medio de x	Diversas
X	Producción acumulada desde el arranque	Unidades
y	Probabilidad acumulativa	Adimensional
y	Tiempo de funcionamiento de una bomba de calor	Horas/año
Y	Costo promedio acumulado, tiempo de producción, etc.	$/unid., hora /unidad, etc.
Y	Proporción de mano de obra de operación, en la ecuación (25-204)	Hora mano de obra/ton
$\bar{Y}$	Costo promedio acumulado por lote, etc.	$/unidad, etc.
z	Puntaje estándar, definido por la ecuación (25-73)	Adimensional
	Símbolos griegos	
α	Factor de proporcionalidad en la ecuación (25-168)	Adimensional
β	Factor de proporcionalidad en la ecuación (25-171)	Adimensional
β	Exponente en ecuaciones (25-106) y (25-117)	Adimensional
δ	Símbolo que indica diferenciación parcial	Adimensional
Δ	Símbolo que indica una diferencia entre cantidades similares	Adimensional
η	Eficiencia de la aportación, definida por la ecuación (25-119)	Adimensional
η	Margen de seguridad, definido por la ecuación (25-229)	Adimensional
θ	Tiempo requerido para producir una cantidad dada de producto	Hora
σ	Desviación estándar de la población	Diversas
Σ	Símbolo que indica una suma de cantidades similares	Adimensional
ϕ	Aumento fraccional en el volumen de producción	Adimensional
ϕ_P	Parámetro definido por la ecuación (25-249)	Adimensional
ψ	Parámetro definido por la ecuación (25-241)	Adimensional
χ	Capacidad de la planta en la ecuación (25-204)	Ton/día
χ	Peso del producto por unidad de materia prima	Adimensional
	Subíndices	
A	Deducción de impuestos que no sea por depreciación del capital	
BD	Depreciación expresada en el balance de la compañia	

Símbolo	Definición	Unidades
BL	Dentro de los límites del proyecto	
BOH	Gastos indirectos presupuestados	
CF	Flujo de efectivo después del pago de impuestos y gastos	
CI	Ingreso de efectivo después del pago de gastos	
DCF	Flujo de efectivo descontado	
DME	Gasto directo de manufactura	
FC	Capital fijo	
FE	Gasto fijo	
FGE	Gasto general fijo	
FIFO	Base primera entrada-primera salida	
FIN	Inventario de recursos financieros	
FME	Gasto fijo de manufactura	
FOH	Gasto indirecto fijo	
GE	Gasto general	
GP	Utilidad bruta	
IME	Gasto indirecto de manufactura	
INV	Inventario	
IO	Costo de pedidos de inventario	
IT	Impuesto sobre la renta por pagar	
IW	Costo de trabajo del inventario	
L	Índice de ingresos de la mano de obra	
L	Valor del cuartil inferior de la variable	
LIFO	Base última entrada-primera salida	
máx	Valor máximo	
M	Valor mediano de la variable	
ME	Gasto de manufactura	
N	Al volumen normal convenido de producción	
NCI	Ingreso neto en efectivo después del pago de impuestos	
NOH	Costo indirecto al volumen normal convenido de producción	
NNP	Utilidad neta después de impuestos	
NP	Utilidad neta antes de impuestos	
OH	Costo indirecto	
p	Transformación	
P	Utilidad	
RM	Materia prima	
s'	En el esésimo año productivo	
S	Ingresos por ventas y otros	
SAV	Sobre la base de promedio simple	
ST	Índice de precios del acero	
$SVOH$	Gasto indirecto semivariable	
TC	Capital total	
TE	Gasto total	
TFE	Gasto fijo total	
TVE	Gasto variable total	
U	Servicios generales	
U	Valor del cuartil superior de la variable	
VE	Gasto variable	
VGE	Gasto general variable	
VME	Gasto variable de manufactura	
VOH	Gasto indirecto variable	
W	Valor ponderado	
WC	Capital de trabajo	
WAV	Sobre la base de promedio ponderado	
1, 2, j, n	1o., 2o., jotaésimo, enésimo año, etc.	

Referencias Generales: Allen, D. H., *A Guide to the Evaluation of Projects*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1972. Aries, R. S., y R. D. Newton, *Chemical Engineering Cost Estimation*, McGraw-Hill, New York, 1955. Baasel W. D., *Preliminary Chemical Engineering Plant Design*, Elsevier, Amsterdam, 1976. Barish, N. N., y S. Kaplan, *Economic Analysis for Engineering and Managerial Decision Making*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1978. Bauman, H. A., *Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964. Bierman, H., Jr., y S. Smidt, *The Capital Budgeting Decision, Economic Analysis and Financing of Investment Projects*, Collier-Macmillan, London, 1975. Canada, J. R., *Intermediate Economic Analysis for Management and Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1971. Carsberg, B. y A. Hope, *Business Investment Decisions under Inflation*, Macdonald & Evans, London, 1976. Chemical Engineering (ed.), *Modern Cost Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1979. Garvin, W. W., *Introduction to Linear Programming*, McGraw-Hill, New York, 1960. Gass, S. I., *Linear Programming*, McGraw-Hill, New York, 1958. Granger, C. W. J., *Forecasting in Business and Economics*, Academic Press, New York, 1980. Hackney, J. W., *Control and Management of Capital Projects*, Wiley, New York, 1965. Happel, J., W. H. Kapfer, B. J. Blewitt, P. T. Shannon, y D. G. Jordan, *Process Economics*, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1974. Holland, F. A., F. A. Watson y J. K. Wilkinson, *Introduction to Process Economics*, Wiley, London, 1983. Institution of Chemical Engineers, London (ed.), *A New Guide to Capital Cost Estimating*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1977. Jelen, F. C., *Cost and Optimization Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1970. Jordan, R. B., *How to Use the Learning Curve*, Materials Management Institute, Boston, 1965. Kharbanda, O. P., *Process Plant and Equipment Cost Estimation*, Sevak Publications, Bombay, 1977. Kirkman, P. R. A., *Inflation Accounting: A Guide for Non-Accountants*, Associated Business Programmes, London, 1975. Koopmans, T. C. (ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*, Wiley, New York, 1951. Liddel, C. J., y A. M. Gerrard, *The Application of Computers to Capital Cost Estimation*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1975. Loomba, N. P., *Linear Programming*, McGraw-Hill, New York, 1964. Merrett, A. J., y A. Sykes, *The Finance and Analysis of Capital Projects*, Longman Group, London, 1963. Merrett, A. J., y A. Sykes, *Capital Budgeting and Company Finance*, Longmans, London, 1966. Ostwald, P. F., *Cost Estimating for Engineering and Management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1974. Park, W. R., *Cost Engineering Analysis*, Wiley, New York, 1973. Peters, M. S., y K. D. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1968. Pilcher, R., *Appraisal and Control of Project Costs*, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1973. Popper, H. (ed.), *Modern Cost Estimating Techniques*, McGraw-Hill, New York, 1970. Ridge, W. J., *Value Analysis for Better Management*, American Management Association, New York, 1969. Rockley, L. E., *Capital Investment Decisions*, Business Books, London, 1968. Rose, L. M., *Engineering Investment Decisions: Planning under Uncertainty*, Elsevier, Amsterdam, 1976. Rudd, D. F., y C. C. Watson, *The Strategy of Process Engineering*, Wiley, New York, 1968. Schlaifer, R., *Probability and Statistics for Business Decisions*, McGraw-Hill, New York, 1959. Tocher, K. D., *The Art of Simulation*, rev. ed., English Universities Pres, London, 1967. Vilbrandt, F. C., y C. E. Dryden, *Chemical Engineering Plant Design*, McGraw-Hill, New York, 1959. Weaver, J.B., "Project Selection in the 1980's", *Chem. Eng. News*, 37-46 (Nov. 2, 1981). Wells, G. L., *Process Engineering with Economic Objectives*, Wiley, New York, 1973. Wilkes, F. M., *Capital Budgeting Techniques*, Wiley, London, 1977. Wood, E. G., *Costing Methods for Managers*, Business Books, London, 1974. Woods, D. R., *Financial Decision Making in the Process Industry*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1975. Wright, M. G., *Financial Management*, McGraw-Hill, London, 1970.

NOMENCLATURA

Se ha intentado agrupar la mayor parte de los métodos disponibles en la actualidad para la evaluación de proyectos y presentarlos en forma de que se puedan utilizar con las técnicas modernas de cómputo. Para este fin, la práctica de los contadores y otros se ha reducido, cuando ha sido posible, a ecuaciones matemáticas que se pueden resolver con calculadoras manuales provistas de teclas de funciones científicas. Para que las ecuaciones se puedan utilizar en computadoras de alta velocidad, se ha intentado crear una nomenclatura apta para máquinas que utilizan compiladores ALGOL, COBOL o FORTRAN. El número de letras y números empleados para definir una variable se ha limitado a cinco. Las letras son en código mnemotécnico en inglés siempre que ha sido posible y se derivan en dos formas. Primera, cuando existe un término contable estándar, se ha abreviado en mayúsculas que van entre paréntesis, por ejemplo (ATR), o sea, relación de rotación de activos o (DCFRR) para tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado. Por supuesto, se omiten los paréntesis cuando el grupo de letras se utiliza para definir el nombre de la variable para la computadora. En segundo lugar, se define un símbolo general para un tipo de variable y se modifica con un subíndice de código mnemotécnico, por ejemplo, una cantidad anual de efectivo, A_{TC}, desembolso total anual de capital para inversión, $/año. Se verá que los símbolos están en una línea a la misma altura cuando el grupo de letras se utiliza para definir el nombre de una variable para la computadora. En otros casos, cuando existen símbolos estándar bien conocidos, por ejemplo, *z* para un puntaje estándar que se utiliza en la distribución normal. Además, se han utilizado *a*, *b*, *c*, *d* y *e* para denotar constantes empíricas y *x* y *y* para denotar variables generales, cuando su empleo no se contrapone con otros significados de los mismos símbolos.

El contenido de esta sección es tan amplio que, a veces, la nomenclatura ha sido un problema que ha requerido el empleo de primas, asteriscos y otros símbolos que no son de aceptación universal en la designación de las variables para computadora. Sin embargo, se ha tenido en cuenta que cada persona sólo programará sus métodos preferidos, lo cual liberará algunos símbolos para otros usos. Además, no es difícil sustituir un símbolo prohibido por uno aceptable; por ejemplo, c^*_{RM} se podría utilizar como CARM y P'_S como PSP con el empleo de una *A* en lugar del asterisco y una *P* en vez de la prima. Para los compiladores que sólo reconocen letras mayúsculas o minúsculas, se puede utilizar un prefijo adicional para distinguir entre letras mayúsculas y minúsculas; para este fin, las letras *U* y *L* se han utilizado en forma restringida en la nomenclatura.

Por supuesto, es imposible tener en cuenta todas las posibles variaciones en los requisitos de ecuaciones y capacidad de la computadora, pero se espera que la notación que aparece al principio de esta sección será adecuada para casi todos los fines y se podrá hacer una ampliación lógica para otros requisitos más especializados.

INVERSIÓN Y RENTABILIDAD

A fin de evaluar la rentabilidad de los proyectos y procesos es necesario definir con precisión los diversos parámetros.

Costos, utilidades y flujos de efectivo anuales Contabilidad se encarga, casi siempre, de los costos anuales. Para evitar confusiones con otros costos, los anuales se identificarán con la letra *A*.

El producto de las ventas anuales de productos, A_S, menos el costo o gasto anual para producir y vender el producto, A_{TE}, con exclusión de cualquier provisión anual para depreciación de la planta, es el ingreso anual de efectivo, A_{CI}:

$$A_{CI} = A_S - A_{TE} \tag{25-1}$$

El ingreso anual neto de efectivo A_{NCI} es el ingreso anual de efectivo, A_{CI}, menos el importe anual de los impuestos A_{IT}:

$$A_{NCI} = A_{CI} - A_{IT} \qquad (25\text{-}2)$$

El ingreso gravable es $(A_{CI} - A_D - A_A)$, en donde A_D es la depreciación anual y A_A es la suma anual de cualesquiera otras deducciones. Se establece una distinción entre la depreciación anual permisible para fines de cálculo de impuestos, la depreciación real en el valor de un activo y la depreciación en libros del valor de ese activo que se presenta en el estado de situación financiera de la empresa. No hay relación necesaria entre estos valores salvo que lo exija la ley, aunque a los dos primeros o a los tres, a menudo, se les asigna el mismo valor en la práctica. Algunos gobiernos otorgan incentivos fiscales para estimular a las empresas a construir plantas en zonas poco atractivas. Ni A_D ni A_A incluyen ningún gasto de efectivo, porque sólo son transacciones en libros. El importe anual de impuestos, A_{IT}, se da por

$$A_{IT} = (A_{CI} - A_D - A_A)t \qquad (25\text{-}3)$$

en donde t es la tasa fraccional de impuestos. El valor de t lo determinan las leyes fiscales y está sujeto a cambio. En la mayor parte de los países industrializados, el valor de t es alrededor de 0.5 o 50%.

El importe anual de impuestos A_{IT} incluido en la ecuación (25-2) no corresponde por necesidad con el ingreso anual en efectivo A_{CI} en ese año. Los pagos de impuestos en la ecuación (25-2) deben ser aquéllos pagados realmente en dicho año. En Estados Unidos, las empresas pagan alrededor del 80% de sus impuestos sobre la base de las utilidades estimadas del año en curso. En el Reino Unido las compañías no pagan impuestos hasta, cuando menos, después de 9 meses del final del periodo contable, lo cual, para la mayor parte, equivale a pagar impuestos sobre las utilidades al año anterior. Cuando se evalúen proyectos para otros países, los ingenieros se deben familiarizar con la situación fiscal en esos países.

En los métodos modernos para evaluar la rentabilidad, los flujos de efectivo son más significativos que las utilidades, pues éstas suelen tener definiciones un tanto vagas. El flujo anual neto de efectivo después de impuestos se expresa con:

$$A_{CF} = A_{NCI} - A_{TC} \qquad (25\text{-}4)$$

en donde A_{TC} es el desembolso anual de capital, que no siempre es cero una vez que se ha construido la planta. Por ejemplo, se puede requerir capital de trabajo, ampliaciones o modificaciones a la planta en años futuros.

El gasto total anual A_{TE} requerido para producir y vender un producto, se puede expresar como la suma del gasto general anual A_{GE} y el costo o gasto/anual de manufactura A_{ME}:

$$A_{TE} = A_{GE} + A_{ME} \qquad (25\text{-}5)$$

El gasto general anual, A_{GE} surge por los siguientes conceptos: administración, ventas, embarques del producto, publicidad y mercadotecnia, servicio técnico, investigación y desarrollo y finanzas.

Los términos utilidad bruta anual A_{GP} y utilidad neta anual A_{NP}, son comúnmente utilizados por contadores y mal utilizados por otros. Por lo general, tanto A_{GP} como A_{NP} se calculan antes de deducir los impuestos. La utilidad bruta anual A_{GP} se expresa con:

$$A_{GP} = A_S - A_{ME} - A_{BD} \qquad (25\text{-}6)$$

en donde A_{BD} es el cargo por depreciación anual en el balance, que no necesariamente es el mismo que A_D utilizado en la ecuación (25-3) para fines de impuestos. La utilidad neta anual, A_{NP}, es simplemente:

$$A_{NP} = A_{GP} - A_{GE} \qquad (25\text{-}7)$$

La ecuación (25-7) también se puede escribir como:

$$A_{NP} = A_{CI} - A_{BD} \qquad (25\text{-}8)$$

La utilidad neta anual después de impuestos, A_{NNP} se puede escribir como:

$$A_{NNP} = A_{NCI} - A_{BD} \qquad (25\text{-}9)$$

Las relaciones entre los diversos costos anuales, expresados por las ecuaciones (25-1) hasta (25-9), se muestran en forma diagramática en la figura 25-1. En la mitad superior del diagrama se muestran los instrumentos, del contador y, en la inferior, los del ingeniero. El flujo anual neto de efectivo, A_{CF}, que excluye cualquier provisión para depreciación, en el balance A_{BD}, se utiliza en dos de los métodos más modernos para evaluar la rentabilidad: el método del valor presente neto (NPV) y el de tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR). En ambos métodos, la depreciación se maneja inherentemente con los cálculos que incluyen la recuperación del capital.

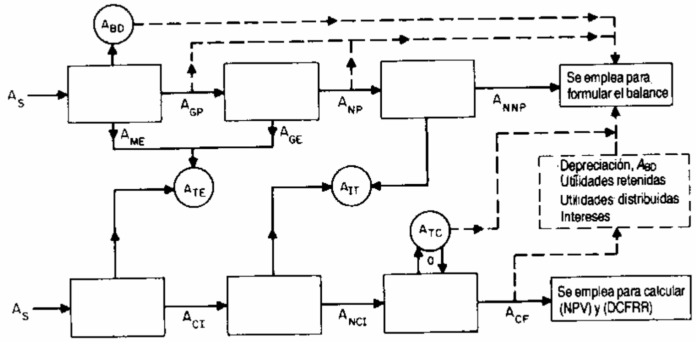


FIG. 25-1 Relación entre costos, utilidades y flujos de efectivo anuales para un proyecto A_{BD} = cargo por depreciación anual; A_{CF} = flujo anual neto de efectivo después de impuestos; A_{CI} = ingreso anual en efectivo; A_{GE} = gastos generales anuales; A_{GP} = utilidad bruta anual; A_{IT} = impuestos anuales; A_{ME} = costo de manufactura anual; A_{NCI} = ingreso neto anual de efectivo; A_{NNP} = utilidad neta anual después de impuestos; A_{NP} = utilidad neta anual; A_S = ventas anuales; A_{TC} = costo total anual; (DCFRR) = tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado; (NPV) = presente neto.

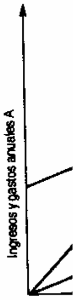


FIG. 25-2 Gráfica co

El gasto general ı
gastos generales fijc

Similarmente el gas
escribir como la sur

Se considera que
al volumen de prod
en el caso a conside
productos terminad
en el periodo en cu
presentan R_P y R_S cc
o producción anual
te proporcional a R,
por fuerza son con
escalonadas a difer
consideran incluid
lo que se presta me
gastos.
Gráficas de apo
zar para dar valios
métodos más comp
descontado. Si el p

FIG. 25-3 Gráfica
costo indirecto.

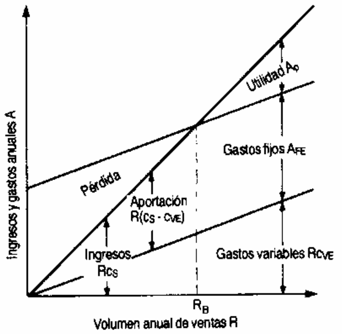


FIG. 25-2 Gráfica convencional de punto de equilibrio.

El gasto general anual A_{GE} se puede escribir como la suma de los gastos generales fijos y variables:

$$A_{GE} = A_{FGE} + A_{VGE} \tag{25-10}$$

Similarmente el gasto anual de manufactura, A_{ME}, también se puede escribir como la suma de los gastos de manufactura fijos y variables:

$$A_{ME} = A_{FME} + A_{VME} \tag{25-11}$$

Se considera que un gasto variable es el directamente proporcional al volumen de producción, R_P o de ventas R_S, según lo más adecuado en el caso a consideración. Salvo que la variación en el inventario de productos terminados sea grande al compararla con la producción total en el periodo en cuestión, se suele tener suficiente exactitud si se representan R_P y R_S con el mismo valor numérico R de unidades de ventas o producción anuales. Se considera que un gasto fijo no es directamente proporcional a R, como son los cargos indirectos. Los gastos fijos no por fuerza son constantes, pero pueden estar expuestos a variaciones escalonadas a diferentes volúmenes de producción. Algunos autores consideran incluidos a dichos escalones en los gastos semivariables, lo que se presta menos al análisis matemático que la citada división de gastos.

Gráficas de aportación y de punto de equilibrio Se pueden utilizar para dar valiosa información preliminar antes del empleo de los métodos más complejos y demorados basados en el flujo de efectivo descontado. Si el precio de venta por unidad es c_S y el gasto variable es

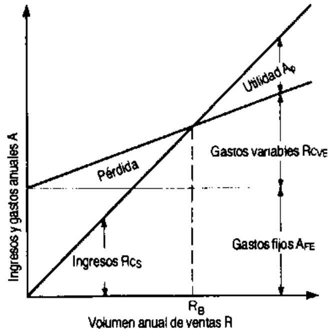


FIG. 25-3 Gráfica de punto de equilibrio que muestra los gastos fijos como un costo indirecto.

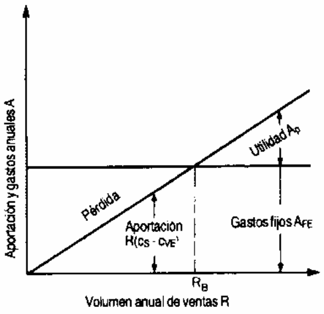


FIG. 25-4 Gráfica de punto de equilibrio que muestra la relación entre la aportación y los gastos fijos.

c_{VE} por unidad de producción, se puede reescribir la ecuación (25-7) como:

$$A_{NP} = R(c_S - c_{VE}) - A_{FE} \tag{25-12}$$

en donde $R(c_S - c_{VE})$ se conoce como aportación anual. La utilidad neta anual es de cero con un volumen anual de producción de

$$R_B = A_{FE}/(c_S - c_{VE}) \tag{25-13}$$

en donde R_B es el volumen de producción de equilibrio.

Las gráficas de punto de equilibrio se pueden trazar en cualquiera de las tres formas mostradas en las figuras 25-2, 25-3 y 25-4. La abscisa indicada como volumen anual de ventas R, a menudo se traza como porcentaje de la capacidad de producción o de ventas R_0. En el caso de buques, aeronaves, etc., se denomina porcentaje de utilización. El porcentaje de margen de seguridad se define como $100(R_0 - R_B)/R_0$.

Una reducción en el precio de venta, c_S, disminuirá la pendiente de las líneas en las figuras 25-2, 25-3 y 25-4 y aumentará el valor requerido R_B de punto de equilibrio para un valor dado de gastos fijos A_{FE}.

Costos de capital El costo de capital total C_{TC} de un proyecto consiste en el costo del capital fijo C_{FC} más el costo del capital de trabajo C_{WC} más el costo de terrenos y otros conceptos no depreciables C_L:

$$C_{TC} = C_{FC} + C_{WC} + C_L \tag{25-14}$$

El proyecto puede ser una planta completa o una ampliación o modificación de una existente.

El costo del capital de trabajo de un proceso o de un negocio suele incluir las partidas indicadas en la tabla 25-1. Dado que el capital de trabajo es totalmente recuperable en cualquier tiempo, en teoría aunque no sea en la práctica, no se incluye como depreciación para reducción de impuestos. Los cambios en el capital de trabajo que surjan por variaciones en los créditos comerciales, nóminas o niveles de inventario, se suelen considerar como gastos necesarios para el negocio excepto cuando exceden del importe a pagar por impuestos. Si el ingreso anual es negativo, se debe proveer capital de trabajo adicional e incluirlo en A_{TC} para ese año. El valor de los terrenos y otras partidas no depreciables aumentan a menudo a lo largo de la vida útil del proyecto. Por tanto, no se consideran en la misma forma que otras inversiones de capital, sino que se presentan como que han tenido utilidad gravable o una pérdida sólo cuando se hace la recuperación final del capital.

El capital de trabajo puede variar desde una fracción muy pequeña del costo total del capital hasta la casi totalidad del capital invertido, según sean el proceso y la industria. Por ejemplo, en una joyería, el capital fijo es muy pequeño en comparación con el capital de trabajo. Por el contrario, en las industrias de procesos químicos, el capital de

TABLA 25-1 Costos del capital de trabajo

Materia prima para puesta en marcha de la planta
Inventarios de materia prima y de productos intermedios y terminados
Costo de manejo y transportación de materiales hasta y desde los almacenes
Costo de control de inventario, almacenamiento, seguros, protección, etc.
Dinero para crédito a clientes en cuentas por cobrar menos cuentas por pagar (crédito de los proveedores)
Dinero para nóminas al empezar las operaciones
Efectivo de fácil disponibilidad para emergencias
Cualquier efectivo adicional requerido para el proceso o el negocio

trabajo es posible que sea del 10 al 20% del valor de la inversión en capital fijo.

Depreciación El término se utiliza en muchos contextos diferentes. Los más comunes son:

1. Una deducción de impuestos
2. Un costo de operación
3. Un medio de crear un fondo para financiar el reemplazo de la planta
4. Una medida de un valor decreciente

En el primer caso, el ingreso gravable anual se reduce mediante un cargo o deducción anual por depreciación cuyo efecto es disminuir la cantidad total de impuestos por pagar. El cargo anual por depreciación es sólo una operación en libros y no incluye ningún desembolso de efectivo. El método para determinar el cargo anual por depreciación depende de las leyes fiscales de cada país.

En el segundo caso, la depreciación se considera como un costo de manufactura en la misma forma que los costos de mano de obra o de materia prima. Sin embargo, es más difícil calcular un costo de depreciación por unidad de producto que hacerlo para los costos de mano de obra o de materia prima. Con los métodos de valor presente neto (NPV) y de tasa de retorno o rendimiento de flujo de efectivo descontado (DCFRR) para medir la rentabilidad, la depreciación, como un costo de operación, queda implícita. El (NPV) y la (DCFRR) dan las medidas del rendimiento después de que un proyecto ha generado suficientes ingresos para amortizar, entre otras cosas, la inversión original y cualesquiera cargos por intereses que el dinero invertido, en otra forma, habría aportado a la empresa.

En el tercer caso, la depreciación se considera como un medio para el reemplazo de la planta. En las modernas industrias de procesos químicos, que tienen cambios tan rápidos, nunca habrá que reemplazar muchas plantas porque los procesos o productos se han vuelto obsoletos durante su "vida" de funcionamiento. La administración debe tener la libertad de invertir en los proyectos más rentables de que se disponga, y la creación de fondos para fines especiales puede impedirlo. Sin embargo, es deseable destinar una proporción de los ingresos retenidos para un fondo con el cual financiar nuevos proyectos de capital. Es muy probable que éstos sean muy diferentes a los proyectos que generaron originalmente los ingresos.

En el cuarto caso, una planta o un equipo tienen una duración o vida útil limitada. La razón principal para disminuirles el valor es la disminución en la futura duración y la reducción consecuente en el número de años en que producirán ingresos. Al final de su duración útil, el equipo quizá no valga nada o puede tener un valor como desecho o chatarra S. Por tanto, un costo de capital fijo C_{FC} se deprecia en valor durante su vida útil de s años en una cantidad que es igual a $(C_{FC} - S)$. La duración o vida útil se calcula desde la puesta en marcha o arranque de la planta.

Sobre la base de depreciación en línea recta, el importe promedio anual de depreciación A_D con una duración en servicio de s años se expresa con:

$$A_D = (C_{FC} - S)/s \tag{25-15}$$

El valor en libros después del primer año P_1 se expresa con:

$$P_1 = C_{FC} - A_D \tag{25-16}$$

El valor en libros al final de un número específico de años s' se expresa con:

$$P_{s'} = C_{FC} - s'A_D \tag{25-17}$$

El principal destino de una tasa particular de depreciación es para fines de impuestos. La depreciación anual permitida se resta del ingreso gravable antes de calcular los impuestos. La base para la depreciación en un caso particular puede ser materia de un convenio entre la empresa y las autoridades fiscales, de acuerdo con las leyes fiscales.

Otros métodos de empleo común para el cálculo de la depreciación son el método de disminución de saldo (también llamado método de porcentaje fijo) y el método de la suma de cifras anuales.

Con el empleo de la depreciación por disminución de saldo (porcentaje fijo), el valor en libros al final del primer año se da con:

$$P_1 = C_{FC}(1 - r) \tag{25-18}$$

en donde r es la fracción que ha sido acordada con las autoridades fiscales.

El valor en libros al final de un número específico de años se indica con:

$$P_{s'} = C_{FC}(1 - r)^{s'} \tag{25-19}$$

Cuando se selecciona que la fracción r sea de $2/s$, es decir, el doble del recíproco de la vida útil s, el método se llama de doble disminución de saldo.

El método para depreciación por disminución de saldo permite depreciar el equipo o la planta en una cantidad más grande durante los primeros años que durante los últimos. Este método no permite depreciar el equipo o la planta a un valor de cero al final de su vida útil.

La cantidad anual de depreciación con el sistema de la suma de las cifras anuales, el importe anual de la depreciación durante un número específico de años s' para una planta con costo de capital fijo C_{FC}, valor como desecho S y duración útil s se expresa con

$$A_{Ds'} = \left(\frac{s - s' + 1}{1 + 2 + 3 + \cdots + s}\right)(C_{FC} - S) \tag{25-20}$$

La ecuación (25-20) se puede escribir también en la forma de:

$$A_{Ds'} = \left[\frac{2(s - s' + 1)}{s(s + 1)}\right](C_{FC} - S) \tag{25-21}$$

Se puede mostrar que el valor en libros al final de un año particular s' es

$$P_{s'} = 2\left[\frac{1 + 2 + \cdots + (s - s')}{s(s + 1)}\right](C_{FC} - S) + S \tag{25-22}$$

La depreciación mediante la suma de cifras anuales permite depreciar el equipo o la planta en un mayor porcentaje durante los primeros años que durante los últimos.

Un cuarto método para calcular la depreciación (rara vez utilizado), es el de fondo de amortización, en el cual la depreciación anual A_D es la misma en cada año de la vida del equipo o de la planta. La serie de cantidades iguales de depreciación A_D, invertidas a una tasa, fraccional de interés i efectuada al final de cada año de la vida del equipo o la planta de s años, se utiliza para acumular una suma futura de dinero igual a $(C_{FC} - S)$. Éste es el costo del capital fijo del equipo o la planta menos su valor de salvamento o desecho y es el importe total de la depreciación durante su vida útil. La ecuación que relaciona a $(C_{FC} - S)$ con A_D es simplemente la ecuación de costo o pago anual escrita como:

C_{FC}

o bien

en donde f_{AF} es el fa

Los valores del fact
sección 1.
En el método de d
de los intereses es ha
del equipo o la plant
y esto implica impu
recuperación del ca
Es preferible no p
fondo para reemplaz
de la diferencia entre
Las leyes fiscales
todos descritos para
es necesario obtene
das por las autorida
La figura 25-5 m
equipo con un costo
útil de 10 años y un
el valor se calcula c
depreciación por do
suma de cifras anua

Medidas tradicion

Métodos de tasa de tasa de rendimie
llez, pueden dar res

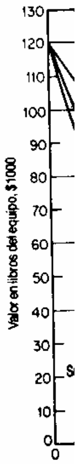


FIG. 25-5 Valor e
ciación.

(25-16)

fico de años s' se ex-

(25-17)

depreciación es para
ida se resta del ingre-
ase para la deprecia-
un convenio entre la
n las leyes fiscales.
lo de la depreciación
i llamado método de
anuales.
ión de saldo (porcen-
i se da con:

(25-18)

n las autoridades fis-

fico de años se indica

(25-19)

es decir, el doble del
doble disminución de

de saldo permite de-
is grande durante los
do no permite depre-
il de su vida útil.
ma de la suma de las
n durante un número
capital fijo C_{FC}, valor

$_{FC} - S)$ (25-20)

i la forma de:

$- S)$ (25-21)

e un año particular s'

$- S) + S$ (25-22)

les permite depreciar
nte los primeros años

n (rara vez utilizado),
reciación anual A_D es
la planta. La serie de
is a una tasa, fraccio-
a vida del equipo o la
ima futura de dinero
fijo del equipo o la
y es el importe total
ción que relaciona a
e costo o pago anual

$$C_{FC} - S = A_D \left[\frac{(1+i)^s - 1}{i} \right] \qquad (25\text{-}23)$$

o bien

$$C_{FC} - S = \frac{A_D}{f_{AF}} \qquad (25\text{-}24)$$

en donde f_{AF} es el factor de valor futuro de la anualidad dado por

$$f_{AF} = i/[(1+i)^s - 1]$$

Los valores del factor de valor futuro f_{AF} aparecen en las tablas de la sección 1.

En el método de depreciación con fondo de amortización, el efecto de los intereses es hacer que la disminución anual en el valor en libros del equipo o la planta sea menor en los primeros que en los últimos años y esto implica impuestos más altos en los primeros años, en los que la recuperación del capital es de máxima importancia.

Es preferible no pensar en la depreciación como una aportación a un fondo para reemplazar el equipo al final de su vida útil, sino como parte de la diferencia entre el ingreso y el gasto, la cual está libre de impuestos.

Las leyes fiscales de algunos países no permiten alguno de los métodos descritos para el cálculo de la depreciación. Cuando se calcula, es necesario obtener todos los detalles de los métodos y tasas permitidas por las autoridades apropiadas y utilizar la información obtenida.

La figura 25-5 muestra la disminución en el valor en libros de un equipo con un costo de capital fijo de \$120 000, una vida o duración útil de 10 años y un valor como desecho de \$20 000. Esta reducción en el valor se calcula con el empleo de 1) depreciación en línea recta, 2) depreciación por doble disminución del saldo y 3) depreciación por la suma de cifras anuales.

Medidas tradicionales de la rentabilidad

Métodos de tasa de rendimiento Aunque los métodos tradicionales de tasa de rendimiento o tasa de retorno tienen la ventaja de la sencillez, pueden dar resultados engañosos. Se basan en la relación

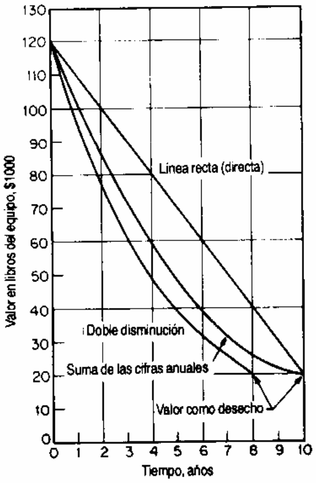


FIG. 25-5 Valor en libros contra el tiempo con diversos métodos para depreciación.

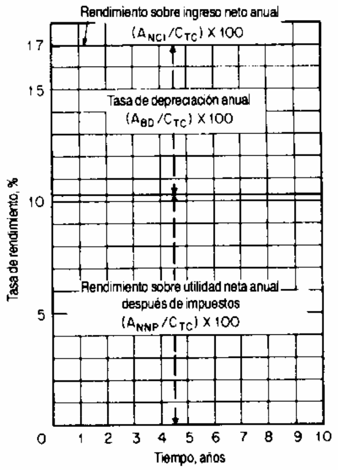


FIG. 25-6 Efecto de la depreciación en línea recta sobre la tasa de rendimiento de un proyecto. A_{BD} = cargo anual por depreciación; A_{NCI} = ingreso neto anual en efectivo después de impuestos; A_{NNP} = utilidad neta anual después de impuestos; C_{TC} = costo de capital total.

Porcentaje de rendimiento

$$= [(\text{utilidad anual})/(\text{capital invertido})]100 \qquad (25\text{-}25)$$

Dado que en la ecuación (25-25) se asignan significados diferentes a la utilidad anual y al capital invertido, es importante definir los términos con precisión. El capital invertido podría ser la inversión total original de capital, la inversión depreciada, la inversión promedio, el valor actual de la inversión o alguna otra cosa. La utilidad anual puede ser la utilidad neta anual antes de impuestos A_{NP}, la utilidad neta anual después de impuesto A_{NNP}, el ingreso anual en efectivo antes de im-

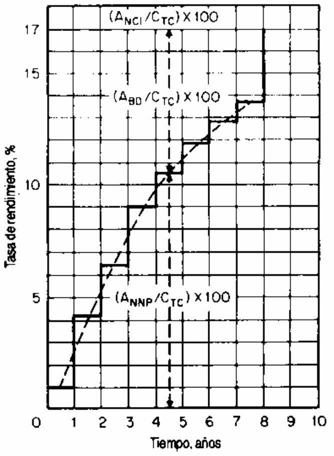


FIG. 25-7 Efecto de la depreciación de doble disminución sobre la tasa de rendimiento de un proyecto.

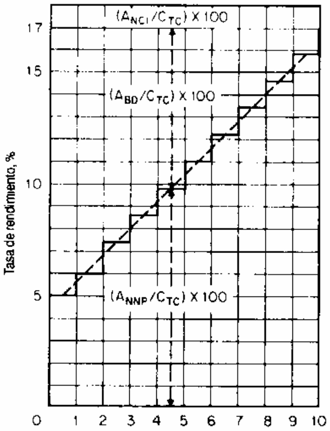


FIG. 25-8 Efecto de la depreciación de suma de las cifras anuales sobre la tasa de rendimiento de un proyecto.

puestos A_{CI}, o el ingreso anual neto en efectivo después de impuestos A_{NCI}.

La tasa fraccional de interés del rendimiento basada en la utilidad neta anual después de impuestos y la inversión original es:

$$i = A_{NNP}/C_{TC} \qquad (25\text{-}26)$$

que se puede escribir en términos de la ecuación (25-9) como

$$i = (A_{NCI}/C_{TC}) - (A_{BD}\ /\ C_{TC}) \qquad (25\text{-}27)$$

en donde A_{BD} es la depreciación anual en el balance. La principal desventaja del empleo de la ecuación (25-27) es que la tasa fraccional de depreciación A_{BD}/C_{TC} se determina en forma arbitraria. Su importe influirá en forma considerable en la tasa fraccional del rendimiento y puede llegar a conclusiones erróneas cuando se hacen comparaciones entre diversas empresas y, en forma muy particular, al hacer comparaciones internacionales.

En las figuras 25-6, 25-7 y 25-8 se muestra el efecto del método de depreciación sobre las utilidades en un proyecto descrito con los siguientes datos:

Ingreso anual neto en efectivo después de impuestos, A_{NCI}:

= \$25 500 en cada uno de los 10 años

Costo del capital fijo, C_{FC} = \$120 000

Valor estimado de salvamento de componentes de la planta S = \$20 000

Capital de trabajo, C_{WC} = \$10 000

Costo del terreno, C_L = \$20 000

En la ecuación (25-27) i se puede considerar sobre la base del ingreso anual neto en efectivo para un año particular o sobre la base de un ingreso neto anual promedio en toda la vida útil del proyecto. Las ecuaciones correspondientes a la ecuación (25-26) basadas en las inversiones depreciada y promedio son dadas respectivamente por

$$i = A_{NNP}/(P_{s'} + C_{WC} + C_L) \qquad (25\text{-}28)$$

y

$$i = 2A_{NNP}/(C_{FC} + S + 2C_{WC} + 2C_L) \qquad (25\text{-}29)$$

en donde $P_{s'}$ es el valor en libros de la inversión en capital fijo al final de un año en particular s'. Si se considera i sobre la base de los valores promedio de A_{NNP} para toda la vida del proyecto, se debe utilizar un valor promedio para el capital de trabajo C_{WC}.

En las ecuaciones (25-28) y (25-29) los cálculos están basados en que no cambiarán los valores del costo del terreno y otros costos no depreciables C_L. Esto es irreal, porque el valor del terreno tiende a aumentar. En tales circunstancias, el principio contable de la tendencia conservadora requiere adoptar la valuación más baja.

Periodo de recuperación Otro método tradicional para medir la rentabilidad es el periodo de recuperación o de retorno del capital fijo. En realidad, no es una medida de rentabilidad sino del tiempo que se requiere para que los flujos de efectivo permitan recuperar el desembolso inicial para capital fijo.

El flujo de efectivo anual neto después de impuestos se expresa con:

$$A_{CF} = A_{NCI} - A_{TC} \qquad (25\text{-}4)$$

en donde A_{TC} es el desembolso anual de capital que no por necesidad es de cero después de haber construido la planta. El periodo de recuperación (PBP) es el tiempo requerido para que el flujo de efectivo neto acumulado considerado desde el arranque de la planta sea igual a la inversión en capital fijo depreciable ($C_{FC} - S$). Es el valor de s' que satisface

$$\sum_{s'=0}^{s'=(\text{PBP})} A_{CF} = C_{FC} - S \qquad (25\text{-}30)$$

El método del periodo de recuperación no considera los flujos de efectivo ni las utilidades percibidas después de que se llega al punto de equilibrio. El método se basa en la premisa de que cuanto más pronto se recupere el capital, mejor habrá resultado el proyecto. Sin embargo, este enfoque puede ser engañoso.

Considérense los proyectos A y B que tienen los flujos anuales de efectivo indicados en la tabla 25-2. Ambos tienen desembolso inicial de capital fijo de \$100 000. Sobre la base del periodo de recuperación, el proyecto A es el más deseable, porque el desembolso en capital fijo se recupera en 3 años, en vez de 5 para el proyecto B. Sin embargo, el proyecto B abarca 7 años con un flujo neto acumulado de efectivo de \$110 000. Por supuesto, es más rentable que el proyecto A, que sólo dura 4 años con flujo neto acumulado de efectivo de sólo \$ 10 000.

TABLA 25-2 Flujos de efectivo para dos proyectos

Año	Flujo de efectivo A_{CF} Proyecto A	Proyecto B
0	−\$100 000	−\$100 000
1	50 000	0
2	30 000	10 000
3	20 000	20 000
4	10 000	30 000
5	0	40 000
6	0	50 000
7	0	60 000
ΣA_{CF}	\$10 000	\$110 000
Periodo de recuperación (PBP)	3 años	5 años

Valor del dinero en el tiempo Una gran parte de la actividad de las empresas se basa en dinero que se puede prestar o tomar en préstamo. Cuando se hace un préstamo, siempre hay el riesgo de que no se pueda cobrar. El incentivo para hacer que el riesgo sea aceptable es una suma de dinero llamada intereses. Cuando se recibe un préstamo, se pagan intereses por el uso del dinero durante cierto periodo. Por el contrario, cuando se hace un préstamo, se reciben o ganan intereses.

El importe de un
largo sea el periodo
suma total de interes
es mayor que su val
la tasa y tipo de inte
Interés simple
cionan mediante

en donde *i* es la tasa
de periodos de inter
un año, en cuyo cas
Interés compues
puesto, en el cual *F*

o bien

en donde el factor d
los factores de inter
El valor presente

o bien

en donde el factor d

Los valores de los
en las tablas e indic
el principal si se apl
en 5% anual comp
Para el caso de di
en años sucesivos) l

F = P(1

Interés compue
vencen *m* veces po
en *n* años. La tasa
la tasa efectiva de i

Se entiende, pue

La tasa anual de
de 5% mensual (es
(25-38) que es:

i = (

Interés compu
el intervalo entre l
el límite, la ecuaci

ın capital fijo al final
la base de los valores
), se debe utilizar un

los están basados en
no y otros costos no
del terreno tiende a
itable de la tendencia
baja.
cional para medir la
torno del capital fijo.
no del tiempo que se
recuperar el desem-

estos se expresa con:

(25-4)

ue no por necesidad
El periodo de recupe-
lujo de efectivo neto
planta sea igual a la
Es el valor de s' que

(25-30)

nsidera los flujos de
e se llega al punto de
e cuanto más pronto
yecto. Sin embargo,

los flujos anuales de
en desembolso ini-
del periodo de recu-
ue el desembolso en
a el proyecto B. Sin
ujo neto acumulado
rentable que el pro-
mulado de efectivo

proyectos

de efectivo A_{CF}

Proyecto B
−$100 000
0
10 000
20 000
30 000
40 000
50 000
60 000
$110 000

5 años

de la actividad de las
tomar en préstamo.
o de que no se pueda
ceptable es una suma
préstamo, se pagan
do. Por el contrario,
ntereses.

El importe de un préstamo se conoce como principal. Cuanto más largo sea el periodo por el cual se presta el principal, mayor será la suma total de intereses pagados. Por tanto, el valor futuro del dinero F es mayor que su valor presente P. La relación entre F y P depende de la tasa y tipo de interés utilizado.

Interés simple Cuando se utiliza el interés simple, F y P se relacionan mediante

$$F = P(1 + ni) \qquad (25\text{-}31)$$

en donde i es la tasa fraccional de interés por periodo y n es el número de periodos de intereses. Por lo general, el periodo de intereses es de un año, en cuyo caso i se conoce como la tasa efectiva de interés.

Interés compuesto anual Es más común utilizar el interés compuesto, en el cual F y P se relacionan por:

$$F = P(1 + i)^n \qquad (25\text{-}32)$$

o bien

$$F = Pf_i \qquad (25\text{-}33)$$

en donde el factor de interés compuesto $f_i = (1 + i)^n$. Existen tablas con los factores de interés compuesto.

El valor presente P de una suma futura de dinero F es:

$$P = F/(1 + i)^n \qquad (25\text{-}34)$$

o bien

$$F = P/f_d \qquad (25\text{-}35)$$

en donde el factor de descuento, f_d, es:

$$f_d = 1/f_i = 1/[(1 + i)^n]$$

Los valores de los factores de descuento se encuentran con facilidad en las tablas e indican que se necesitarán 7.3 años para que se duplique el principal si se aplica un 10% anual compuesto y 14.2 años si se aplica en 5% anual compuesto.

Para el caso de diferentes tasas fraccionales de interés anual ($i_1, i_2, \ldots, i_n$ en años sucesivos) la ecuación (25-32) se debe escribir en forma de:

$$F = P(1 + i_1)(1 + i_2)(1 + i_3) \cdots (1 + i_n) \qquad (25\text{-}36)$$

Interés compuesto con intervalos cortos Si los pagos de intereses vencen m veces por año, con interés compuesto, se requieren mn pagos en n años. La tasa nominal de interés anual i' se divide entre m para dar la tasa efectiva de intereses por periodo. Por tanto,

$$F = P[1 + (i'/m)]^{mn} \qquad (25\text{-}37)$$

Se entiende, pues, que la tasa efectiva de interés anual i se indica con

$$i = [1 + (i'/m)]^m - 1 \qquad (25\text{-}38)$$

La tasa anual de interés equivalente a una tasa de interés compuesto de 5% mensual (es decir, $i'/m = 0.05$) se calcula a partir de la ecuación (25-38) que es:

$$i = (1 + 0.05)^{12} - 1 = 0.796 \text{ o } 79.6\% \text{ anual}$$

Interés compuesto continuo Conforme m se aproxima a infinito, el intervalo entre los pagos se vuelve infinitesimalmente pequeño y, en el límite, la ecuación (25-37) se reduce a:

$$F = P \exp(i'n) \qquad (25\text{-}39)$$

Una comparación de las ecuaciones (25-32) y (25-39) muestra que la tasa nominal de interés i' sobre la base continua está relacionada con la tasa, efectiva de interés anual i mediante

$$\exp(i'n) = (1 + i)^n \qquad (25\text{-}40)$$

La diferencia numérica entre el interés compuesto continuo y el anual es pequeña. En la práctica, es probable que sea mucho menor que los errores en los datos de flujo estimado de efectivo. El interés compuesto anual va más de acuerdo con las prácticas contables aceptadas en la actualidad. Sin embargo, la pequeña diferencia entre el interés continuo y el anual puede ser importante cuando se trata de grandes sumas de dinero.

Supóngase que se invierten $100 a una tasa nominal de intereses de 5%. Luego, se calcula el valor futuro de la inversión después de dos años y se calcula la tasa anual efectiva de interés para las siguientes clases de intereses: 1) simple, 2) compuesto anual, 3) compuesto mensual, 4) compuesto diario y 5) compuesto continuo. En la tabla siguiente se indican los resultados de los cálculos, así como las ecuaciones que se deben emplear:

Tipo de interés	Ecuación	Valor futuro F	Tasa real i, %	Ecuación
1	(25-31)	$110.000	5	(25-31)
2	(25-32)	$110.250	5	(25-38)
3	(25-37)	$110.495	5.117	(25-38)
4	(25-37)	$110.516	5.1267	(25-38)
5	(25-39)	$110.517	5.1271	(25-38)

Cuando se calcula la tasa anual efectiva para compuesto continuo, el primer término de la ecuación (25-38), $[1 + (i'/m)]^m$ se aproxima a $e^{i'}$ cuando m se aproxima a infinito.

Costo o pago anual Se puede utilizar una serie de pagos anuales iguales A invertidos a una tasa fraccional de interés i al final de cada año, durante un periodo de n años, para acumular una suma futura de dinero F. Estas relaciones se expresan con

$$F = A\left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i}\right] \qquad (25\text{-}41)$$

o bien

$$F = A/f_{AF} \qquad (25\text{-}42)$$

en donde el factor del valor futuro de la anualidad es

$$f_{AF} = i/[(1 + i)^n - 1]$$

Los valores de f_{AF} se encuentran en las tablas existentes.

La ecuación (25-41) se puede combinar con la ecuación (25-34) para obtener

$$P = A\left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}\right] \qquad (25\text{-}43)$$

$$P = A/f_{AP} \qquad (25\text{-}44)$$

en donde P es el valor presente de la serie de futuros pagos anuales iguales A y el factor de valor presente de la anualidad es:

$$f_{AP} = [i(1 + i)^n]/[(1 + i)^n - 1]$$

Los valores de f_{AP} también se encuentran en las tablas existentes.

Como opción, el pago anual A requerido para crear una suma futura de dinero F con valor presente de P se expresa con

$$A = Ff_{AF} \qquad (25\text{-}45)$$

$$A = Pf_{AP} \qquad (25\text{-}46)$$

La ecuación (25-41) representa la suma futura de una serie de pagos anuales uniformes que se invierten a una tasa determinada de interés para un periodo de algunos años. Este procedimiento es lo que constituye una anualidad ordinaria. Otras formas de anualidades incluyen la anualidad anticipada, en la cual los pagos se hacen al principio en vez de al final del año, y la anualidad diferida, en la cual se difiere el primer pago durante un número definido de años.

Costo capitalizado Un equipo con un costo de capital fijo C_{FC} tendrá una vida finita de n años. El costo capitalizado del equipo C_K se define mediante

$$(C_K - C_{FC})(1 + i)^n = C_K - S \qquad (25\text{-}47)$$

C_K excede de C_{FC} en una cantidad que, cuando se compone a una tasa de interés anual i durante n años, tendrá un valor futuro de C_K menos el valor de salvamento o desecho S. Si el costo de reposición del equipo permanece constante en $(C_{FC} - S)$ y la tasa de interés permanece constante en i, entonces C_K es la cantidad de capital requerido para reponer el equipo a perpetuidad.

La ecuación (25-41) se puede reescribir como

$$C_K = \left[C_{FC} - \frac{S}{(1 + i)^n}\right]\left[\frac{(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}\right] \qquad (25\text{-}48)$$

o bien

$$C_K = (C_{FC} - Sf_d)f_k \qquad (25\text{-}49)$$

en donde f_d es el factor de descuento y f_k, el factor de costo capitalizado, es:

$$f_k = [(1 + i)^n]/[(1 + i)^n - 1]$$

Los valores para cada factor se pueden encontrar en las tablas.

Ejemplo 1 Se ha instalado un equipo con un costo de \$100 000 y se espera que tendrá una vida útil de 10 años y un valor de desecho de \$20 000. Calcúlese el costo capitalizado del equipo con base en una tasa anual de interés compuesto de 5%.

Por tanto, se sustituyen los valores en la ecuación (25-48) para dar:

$$C_K = \left[\$100\,000 - \frac{\$20\,000}{(1 + 0.05)^{10}}\right]\left[\frac{(1 + 0.05)^{10}}{(1 + 0.05)^{10} - 1}\right]$$

$$C_K = [\$100\,000 - (\$20\,000/1.62889)](2.59009)$$

$$C_K = \$227\,207$$

Mediciones modernas de la rentabilidad Para que una inversión en un proceso de manufactura valga la pena, debe rendir más que el costo del capital. Cuanto mayores sean las ganancias adicionales, más rentable será la empresa y mayor será la justificación para poner a riesgo el capital. Un cálculo de rentabilidad es un intento por cuantificar la deseabilidad de correr el riesgo.

Las formas para evaluar la rentabilidad que se mencionarán en esta sección son **1**) tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR), **2**) valor presente neto (NPV) basado en una tasa particular de descuento, **3**) periodo equivalente de inversión máxima (EMIP), **4**) periodo de recuperación de intereses (IRP) y **5**) punto de equilibrio descontado (DBEP).

Flujo de efectivo Considérese un proyecto en el cual C_{FC} = \$1 000 000, C_{WC} = \$90 000 y C_L = \$10 000. Por tanto, C_{TC} = \$1 100 000 según la ecuación (25-14). Si todo el desembolso de capital ocurre en el año 0 del proyecto, entonces A_{TC} = \$ 1 100 000 en el año 0 y $-A_{TC}$ = -\$1 100 000. En la ecuación (25-4) se ve que cualquier desembolso de capital hace una aportación negativa al flujo anual neto de efectivo, A_{CF}.

Considérese otro proyecto en el cual el desembolso de capital fijo se distribuye en dos años, de acuerdo con el siguiente patrón:

$$C_{FC} = C_{FC0} + C_{FC1}$$

Año 0	Año 1
C_{FC0} = \$400 000	C_{FC1} = \$600 000
C_L = 10 000	C_{WC} = 90 000
A_{TC} = 410 000	A_{TC} = 690 000

En el año final del proyecto, se recuperan el capital de trabajo y el terreno que, en este caso, costó un total de \$100 000. Entonces, en el año final del proyecto, ATC = -\$100 000 y -ATC = +\$100 000. En la ecuación (25-4) se ve que cualquier recuperación de capital hace una aportación positiva al flujo anual neto de efectivo.

Durante las etapas de desarrollo y construcción de un proyecto, A_{CI} y A_{IT} son cero en las ecuaciones (25-2) y (25-4). Para este periodo, el flujo de efectivo del proyecto es negativo y se indica con:

$$A_{CF} = -A_{TC} \qquad (25\text{-}50)$$

En la figura 25-9 aparecen las etapas de flujo de efectivo en un proyecto. El desembolso durante la etapa de investigación y desarrollo suele ser más o menos pequeño. Por lo general, incluyen un diseño preliminar del proceso y un estudio de mercado. Una vez tomada la decisión de seguir adelante con el proyecto, empezará el diseño en detalle de ingeniería del proceso y empieza a aumentar el volumen de desembolso y aumenta todavía más cuando se compra el equipo y se inicia la construcción. No hay rendimiento sobre la inversión hasta que se pone en marcha la planta. Incluso durante la puesta en marcha o arranque, hay ciertos gastos adicionales. Una vez que la planta funciona sin tropiezos, se establece una entrada de efectivo. Durante las primeras etapas de un proyecto, en algunos países las leyes fiscales permiten un crédito contra impuestos debido a que hay gastos sin un correspondiente ingreso.

Flujo de efectivo descontado El valor presente P de una suma futura de dinero F se expresa por

$$P = Ff_d \qquad (25\text{-}51)$$

en donde $f_d = 1/(1 + i)^n$, que es el factor de descuento; sus valores se encuentran en las tablas. Por ejemplo, \$90 909 invertidos a una tasa de interés anual de 10% se convierten en \$100 000 después de un año. En forma similar, \$38 554 invertidos al 10% se convierten en \$100 000 al cabo de 10 años.

Entonces, el flujo de efectivo en los primeros años de un proyecto tiene mayor valor que la misma cantidad en los años posteriores. Por tanto, da utilidades recibir el dinero lo más pronto que sea posible y demorar el pago del dinero todo el tiempo que se pueda.

Se tiene en cuenta el tiempo cuando se emplea el flujo anual de efectivo descontado, A_{DCF}, que está relacionado con el flujo anual de efectivo A_{CF} y con el factor de descuento f_d mediante

$$A_{DCF} = A_{CF}f_d \qquad (25\text{-}52)$$

Entonces, al final de cualquier año, n,

$$(A_{DCF})_n = (A_{CF})_n/(1 + i)^n$$

La suma de los flujos anuales de efectivo descontado durante n años, ΣA_{DCF}, se conoce como el valor presente neto (NPV) del proyecto:

$$(\text{NPV}) = \sum_0^n (A_{DCF})_n \qquad (25\text{-}53)$$

El valor de (NPV) depende en forma directa de la elección de la tasa fraccional de interés i. Se puede seleccionar una tasa de interés a fin de que (NPV) = 0 después de un número seleccionado de años. Este valor de i se encuentra a partir de

Año 1
C_{FCI} = $600 000
C_{WC} = 90 000
A_{TC} = 690 000

apital de trabajo y el
000. Entonces, en el
C = +$100 000. En la
n de capital hace una
).
a de un proyecto, A_{CI}
Para este periodo, el
lica con:

(25-50)

jo de efectivo en un
investigación y de-
o general, incluyen
o de mercado. Una
el proyecto, empe-
roceso y empieza a
a todavía más cuan-
ción. No hay rendi-
n marcha la planta.
, hay ciertos gastos
in tropiezos, se es-
imeras etapas de un
permiten un crédito
un correspondiente

nte P de una suma fu-

(25-51)

uento; sus valores se
vertidos a una tasa de
después de un año. En
ierten en $100 000 al

años de un proyecto
años posteriores. Por
nto que sea posible y
se pueda.
lea el flujo anual de
lo con el flujo anual
mediante

(25-52)

escontado durante n
neto (NPV) del pro-

(25-53)

la elección de la tasa
asa de interés a fin de
o de años. Este valor

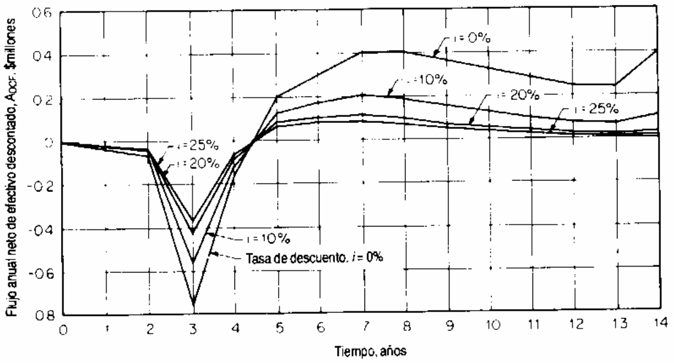


FIG. 25-9 Efecto de la tasa de descuento sobre los flujos de efectivo.

$$\sum_0^n (A_{DCF})_n = \frac{(A_{CF})_0}{(1+i)^0} + \frac{(A_{CF})_1}{(1+i)^1} + \cdots + \frac{(A_{CF})_n}{(1+i)^n} = 0 \qquad (25\text{-}54)$$

La ecuación (25-54) se puede resolver para i ya sea con una gráfica o con un procedimiento iterativo de prueba y error. El valor de i dado por la ecuación (25-54) se conoce como tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR). También se le llama índice de rentabilidad, tasa verdadera de retorno o rendimiento, tasa de rendimiento para los inversionistas y tasa de interés de rendimiento.

Curvas de flujo de efectivo En la figura 25-9 aparecen las etapas de flujo de efectivo de un proyecto junto con sus valores de flujo de efectivo descontado, dados en la tabla 25-3. Además de las curvas de flujo de efectivo y de flujo de efectivo descontado, es conveniente trazar las curvas del flujo de efectivo acumulado y del flujo de efectivo descontado acumulado, que aparecen en la figura 25-10 para los datos de la tabla 25-3.

El costo del capital se puede considerar como la tasa de interés a la cual se puede invertir el dinero en lugar de someterlo a riesgo en un proceso de manufactura. Considérense los datos del proceso de la tabla 25-3, trazados en la figura 25-10. Si el costo del capital es de 10%, entonces la curva correspondiente del flujo de efectivo descontado (Fig. 25-10) es *abcdef*. Hasta el punto *e*, o sea, 8.49 años, el capital está en riesgo. El punto *e* es el punto de equilibrio descontado (DBEP). En este punto, el proceso de manufactura ya ha amortizado su capital y producido el mismo rendimiento que el de una suma equivalente de capital invertida a una tasa de interés compuesto del 10%. Más allá del punto de equilibrio, el capital ya no está en riesgo y cualquier flujo de efectivo por encima de la línea de base horizontal, $\Sigma A_{DCF} = 0$ excede del rendimiento sobre una cantidad equivalente de capital invertida a una tasa de interés compuesto de 10%. Por tanto, cuanto mayor sea el área encima de la línea de base, más rentable será el proceso.

Cuando se calculan (NPV) y (DCFRR), no se considera la depreciación como un gasto separado, sino que sólo se utiliza como una deducción de los impuestos anuales de acuerdo con las leyes fiscales del país. El impuesto por pagar se deduce de acuerdo con la ecuación (25-2) en el año en que se paga, que puede ser diferente del año en que se obtuvo el ingreso gravable correspondiente.

Una (DCFRR) de, por ejemplo, 15%, implica que se ganará el 15% anual sobre la inversión, además de lo cual el proyecto genera suficiente dinero para pagar la inversión original más cualesquiera intereses pagaderos sobre capital tomado a préstamo más todos los impuestos y gastos.

No suele ser posible efectuar una evaluación completa de la rentabilidad con una sola cifra. La forma de las curvas de flujo de efectivo y flujo de efectivo descontado acumulados, antes y después del punto de equilibrio, es un factor importante.

D. H. Allen [*Chem. Eng.* **74**, 75-78 (julio 3, 1967)] tuvo en cuenta la forma de la curva de flujo de efectivo sin descontar acumulado, hasta llegar al punto de equilibrio e_0 en la figura 25-10 con el empleo de un parámetro conocido como periodo equivalente de inversión máxima (EMIP) que se define como:

$$(\text{EMIP}) = \frac{\text{área}(a_0 \text{ hasta } e_0)}{(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}}} \quad \text{para} \quad A_{CF} \leq 0 \qquad (25\text{-}55)$$

en donde el área (a_0 hasta e_0) significa el área que está debajo de la línea de base horizontal ($\Sigma A_{CF} = 0$) en la curva de flujo de efectivo acumulado en la (Fig. 25-10). La suma $(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}}$ es el desembolso acumulado máximo en el proyecto que se indica con el punto d_0 en la figura 25-10. (EMIP) es un tiempo en años y es el periodo equivalente durante el cual estaría insoluta la deuda total del proyecto si se hubiera incurrido en su totalidad en un momento determinado y se hubiera pagado de una sola vez. Por supuesto, cuanto más corto sea (EMIP) más atractivo será el proyecto.

Allen también tuvo en cuenta la forma de la curva de flujo de efectivo acumulado más allá del punto de equilibrio con el empleo de un parámetro conocido como periodo de recuperación de intereses (IRP). Este es el periodo (Fig. 25-11) que hace que el área (e_0 hasta f_0) encima de la línea de base horizontal sea igual al área (a_0 hasta e_0) debajo de esa línea en la curva de flujo de efectivo acumulado.

C. G. Sinclair [*Chem. Process. Eng.*, **47**, 147 (1966)] ha tenido en cuenta parámetros similares a (EMIP) y (IRP) con base en la curva de flujo de efectivo descontado acumulado.

Si se examinan las etapas de flujo de efectivo en la figura 25-10 se verán los factores que pueden influir en (EMIP) y en (IRP). Si se aumenta la inversión requerida de capital, es necesario incrementar el volumen de ingresos después del arranque para que (EMIP) permanezca igual. Para que (EMIP) sea breve, es necesario mantener cortas las etapas de investigación y desarrollo, diseño y construcción.

Ejemplo 2 En los siguientes datos se describe un proyecto. Los ingresos por ventas anuales y el gasto total anual en un periodo de 10 años se presentan en las tres primeras columnas de la tabla 25-4. La inversión en capital fijo, C_{FC}, es $1 000 000. Los componentes de la planta tienen cero valor de salvamento. El capital de trabajo, C_{WC} es $90 000 y el costo del terreno, C_L, es de $10 000. No hay deducciones de impuestos aparte de la depreciación, es decir, A_A es de cero. La tasa fraccional de impuestos t es 0.50.

TABLA 25-3 Flujos anuales de efectivo y de efectivo descontado para un proyecto

			Descontado al 10%			Descontado al 20%			Descontado al 25%		
Año	A_{CF}, $	ΣA_{CF}, $	f_d	A_{DCF}, $	ΣA_{DCF}, $	f_d	A_{DCF}, $	ΣA_{DCF}, $	f_d	A_{DCF}, $	ΣA_{DCF}, $
0	−10 000	−10 000	1.00000	−10 000	−10 000	1.00000	−10 000	−10 000	1.00000	−10 000	−10 000
1	−30 000	−40 000	0.90909	−27 273	−37 273	0.83333	−25 000	−35 000	0.80000	−24 000	−34 000
2	−60 000	−100 000	0.82645	−49 587	−86 860	0.69444	−41 666	−76 666	0.64000	−38 400	−72 400
3	−750 000	−850 000	0.75131	−563 483	−650 343	0.57870	−434 025	−510 691	0.51200	−384 000	−456 400
4	−150 000	−1 000 000	0.68301	−102 452	−752 795	0.48225	−72 338	−583 029	0.40960	−61 440	−517 840
5	+200 000	−800 000	0.62092	+124 184	−628 611	0.40188	+80 376	−502 653	0.32768	+65 536	−452 304
6	+300 000	−500 000	0.56447	+169 341	−459 270	0.33490	+100 470	−402 183	0.26214	+78 642	−373 662
7	+400 000	−100 000	0.51316	+205 264	−254 006	0.27908	+111 632	−290 551	0.20972	+83 888	−289 774
8	+400 000	+300 000	0.46651	+186 604	−67 402	0.23257	+93 028	−197 523	0.16777	+67 108	−222 666
9	+360 000	+660 000	0.42410	+152 676	+85 274	0.19381	+69 772	−127 751	0.13422	+48 319	−174 347
10	+320 000	+980 000	0.38554	+123 373	+208 647	0.16151	+51 683	−76 068	0.10737	+34 358	−139 989
11	+280 000	+1 260 000	0.35049	+98 137	+306 784	0.13459	+37 685	−38 383	0.08590	+24 052	−115 937
12	+240 000	+1 500 000	0.31863	+76 471	+383 255	0.11216	+26 918	−11 465	0.06872	+16 493	−99 444
13	+240 000	+1 740 000	0.28966	+69 518	+452 773	0.09346	+22 430	+10 965	0.05498	+13 195	−86 249
14	+400 000	+2 140 000	0.26333	+105 332	+558 105	0.07789	+31 156	+42 121	0.04398	+17 592	−68 657

NOTA: A_{CF} = flujo anual neto de efectivo; A_{DCF} = flujo anual neto de efectivo descontado; f_d = factor de descuento con la tasa de interés indicada; ΣA_{CF} = flujo de efectivo acumulado; ΣA_{DCF} = flujo de efectivo descontado acumulado.

Se calcularán, para estos datos, el valor presente neto (NPV) para los siguientes métodos de depreciación y factores de descuento:

a. En línea recta, 10%
b. En línea recta, 20%
c. Por doble disminución del saldo, 10%
d. Suma de las cifras anuales, 10%
e. En línea recta, 10%; pago de impuestos diferido por un año

Además, se calculará la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) con depreciación en línea recta (directa).

a. Para empezar el cálculo en este ejemplo, hay que encontrar el costo total de capital, C_{TC}, para el proyecto mediante la ecuación (25-14). En este caso, C_{TC} = \$1 100 000. En el año 0, esta cantidad es la misma que el desembolso neto anual de capital A_{TC} y aparece en la tabla 25-4.

El porcentaje anual de depreciación en línea recta de la inversión en capital fijo, C_{FC}, a partir de \$1 000 000 al arranque, hasta un valor de salvamento S de cero al final de una vida productiva s de 10 años, se expresa con:

$$A_D = (C_{FC} - S)/s$$

$$A_D = (\$1\,000\,000 - \$0)/10 \text{ años} = \$100\,000 \text{ anuales}$$

El ingreso anual en efectivo A_{CI} para el año 1, cuando A_S = \$400 000 anuales y A_{TE} = \$100 000 anuales, es, de acuerdo con la ecuación (25-1), de \$300 000 anuales. Los valores para los años siguientes se calculan en la misma forma y aparecen en la tabla 25-4.

El importe anual de impuestos A_{IT} para el año 1, cuando A_{CI} = \$300 000 anuales, A_D = \$100 000 anuales, A_A = \$0 anuales y t = 0.50, se encuentra, con la ecuación (25-3), que es de:

$$A_{IT} = [(\$300\,000 - \$100\,000 - \$0)/\text{año}](0.50)$$
$$= \$100\,000 \text{ anuales}$$

Los valores para los años subsecuentes se calculan en la misma forma y aparecen en la tabla 25-4.

El flujo anual neto de efectivo, después de impuestos, A_{CF}, para el año 0, cuando A_{CI} = \$0 anuales, A_{IT} = \$0 anuales y A_{TC} = \$1 100 000 anuales se encuentra, con la ecuación (25-4), que es:

$$A_{CF} = \$0 \text{ anuales} - \$1\,100\,000 \text{ anuales} = -\$1\,100\,000 \text{ anuales}$$

El flujo anual neto de efectivo, después de impuestos, A_{CF}, para el año 1, cuando A_{CI} = \$300 000 anuales, A_{IT} = \$100 000 anuales y A_{TC} = \$0 anuales se encuentra, con las ecuaciones (25-2) y (25-4) que es:

$$A_{CF} = \$200\,000 \text{ anuales} - \$0 \text{ anuales} = \$200\,000 \text{ anuales}$$

Los valores para los demás años, incluso el año 9, se calculan en la misma forma y aparecen en la tabla 25-4.

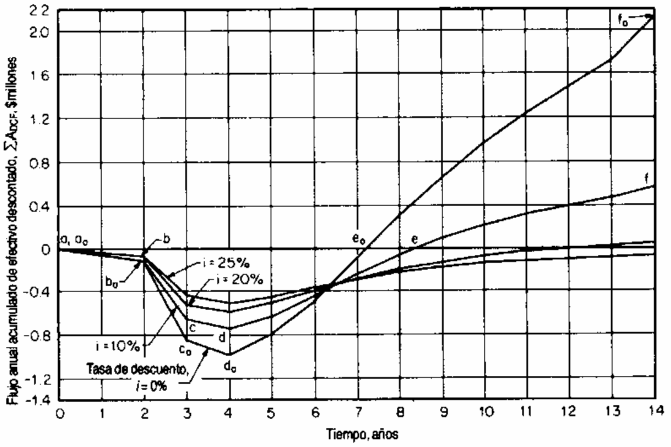


FIG. 25-10 Efecto de la tasa de descuento sobre los flujos de efectivo acumulados.

El final del año 10, se
del terreno (C_L = \$10 0
año 10 es de −\$100 000
impuestos, para el año
ecuación (25-4):

A_{CF} =

=

El flujo anual neto
\$200 000 anuales y f_d
(25-52) que es:

A_{DCF} = (\$20

Los valores para los
recen en la tabla 25-4.

Para encontrar el val
cada año, como se indi
sente neto es \$276 210

TABLA 25-4 Fl

Año	A_S, $
0	0
1	400 000
2	500 000
3	500 000
4	500 000
5	520 000
6	520 000
7	520 000
8	390 000
9	350 000
10	280 000

A_S = ingresos por
A_{TE} = gastos total
A_{CI} = ingreso anu
$A_D + A_A$ = depreci
$A_{CI} - A_D - A_A$ = in
A_{IT} = ($A_{CI} - A_D -$

ıtado al 25%

$_{DCF}$, $	ΣA_{DCF}, $
0 000	−10 000
4 000	−34 000
8 400	−72 400
4 000	−456 400
1 440	−517 840
5 536	−452 304
8 642	−373 662
3 888	−289 774
7 108	−222 666
8 319	−174 347
4 358	−139 989
4 052	−115 937
6 493	−99 444
3 195	−86 249
7 592	−68 657

ficada; ΣA_{CF} = flujo de

n en la misma forma y

lo A_{CI} = $300 000 anua-
0, se encuentra, con la

50)

ı la misma forma y apa-

A_{CF}, para el año 0, cuan-
0 anuales se encuentra,

100 000 anuales

A_{CF}, para el año 1, cuan-
= $0 anuales se encuen-

00 anuales.

e calculan en la misma

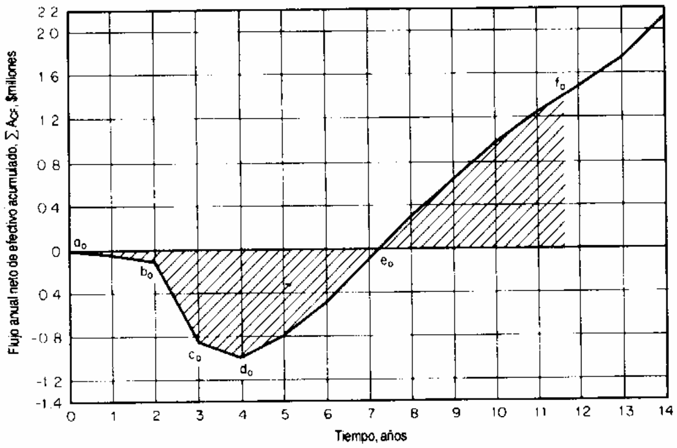


FIG. 25-11 Flujo de efectivo acumulado contra el tiempo, mostrando el periodo de recuperación de intereses.

El final del año 10, se recuperan el capital de trabajo (C_{WC} = $90 000) y el costo del terreno (C_L = $10 000) de modo que el desembolso anual de capital A_{TC} en el año 10 es de −$100 000 anuales. Por tanto, el flujo anual de efectivo después de impuestos, para el año 10 debe reflejar esta recuperación. Con el empleo de la ecuación (25-4):

$$A_{CF} = \$110\,000 \text{ anuales} - (-\$100\,000 \text{ anuales})$$

$$= \$210\,000 \text{ anuales}$$

El flujo anual neto de efectivo descontado A_{DCF} para el año 1 cuando A_{CF} = $200 000 anuales y f_d = 0.90909 (para i = 10%) se encuentra con la ecuación (25-52) que es:

$$A_{DCF} = (\$200\,000 \text{ anuales})(0.90909) = \$181\,820 \text{ anuales}$$

Los valores para los años subsecuentes se calculan en la misma forma y aparecen en la tabla 25-4.

Para encontrar el valor presente neto (NPV) se suman los valores de A_{CDF} para cada año, como se indica en la ecuación (25-53). Se encontrará que el valor presente neto es $276 210, como se indica en el último concepto en la tabla 25-4.

b. Se utiliza el mismo procedimiento para i = 20%. Los factores de descuento que se utilizarán en una tabla similar a la tabla 25-4 son los correspondientes a 20%. Se encontrará que (NPV) es de −$151 020.

c. Los cálculos son similares a los del subejemplo *a*, excepto que la depreciación se calcula con el método de doble disminución del saldo de la ecuación (25-19). Se encontrará que el valor presente neto es de $288 530.

d. Los cálculos también son similares a los del subejemplo *a*, excepto que la depreciación se calcula con el método de la suma de las cifras anuales de la ecuación (25-20). Se encontrará que el valor presente neto es de $316 610.

e. Los cálculos son con el mismo procedimiento que en el subejemplo *a*, pero el importe anual de los impuestos A_{IT} se calcula para un año particular y se deduce del ingreso anual de efectivo, A_{CI}, para el año siguiente. Se encontrará que el valor presente neto para el año 11 es de $341 980.

La tasa aproximada de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) se puede obtener con la interpolación del (NPV) para i = 10% y para i = 20%.

$$(\text{DCFRR}) = 0.100 + [(\$276\,210)(0.20 - 0.10)]/[\$276\,210 - (-\$151\,020)]$$

$$(\text{DCFRR}) = 0.164 \text{ o } 16.4\%$$

TABLA 25-4 Flujos anuales de efectivo, depreciación en línea recta y factor de descuento de 10%

	Antes de impuestos						Después de impuestos				
Año	A_S, $	A_{TE}, $	A_{CI}, $	$A_D + A_A$, $	$A_{CI} - A_D - A_A$, $	A_{IT}, $	A_{TC}, $	A_{CF}, +$	f_d	A_{DCF}, $	(NPV), $
0	0	0	0	0	0	0	+1 100 000	−1 100 000	1.0000	−1 100 000	−1 100 000
1	400 000	100 000	300 000	100 000	200 000	100 000	0	200 000	0.90909	181 820	−918 180
2	500 000	100 000	400 000	100 000	300 000	150 000	0	250 000	0.82645	206 610	−711 570
3	500 000	110 000	390 000	100 000	290 000	145 000	0	245 000	0.75131	184 070	−527 500
4	500 000	120 000	380 000	100 000	280 000	140 000	0	240 000	0.68301	163 920	−363 580
5	520 000	130 000	390 000	100 000	290 000	145 000	0	245 000	0.62092	152 120	−211 460
6	520 000	130 000	390 000	100 000	290 000	145 000	0	245 000	0.56447	138 300	−73 160
7	520 000	140 000	380 000	100 000	280 000	140 000	0	240 000	0.51316	123 160	+50 000
8	390 000	140 000	250 000	100 000	150 000	75 000	0	175 000	0.46651	81 640	+131 640
9	350 000	150 000	200 000	100 000	100 000	50 000	0	150 000	0.42410	63 610	+195 250
10	280 000	160 000	120 000	100 000	20 000	10 000	−100 000	210 000	0.38554	80 960	+276 210

A_S = ingresos por ventas anuales.
A_{TE} = gastos totales anuales.
A_{CI} = ingreso anual de efectivo.
$A_D + A_A$ = depreciación anual y otras deducciones de impuestos.
$A_{CI} - A_D - A_A$ = ingreso gravable.
$A_{IT} = (A_{CI} - A_D - A_A)t$ = importe de impuestos con t = 0.5.
A_{TC} = desembolso anual total de capital.
$A_{CF} = A_{CI} - A_{IT} - A_{TC}$ = flujo anual neto de efectivo.
f_d = factor de descuento al 10%.
A_{DCF} = flujo anual neto de efectivo descontado.
(NPV) = ΣA_{DCF} = valor presente neto.

El cálculo de (DCFRR) suele requerir una solución mediante prueba y error de la ecuación (25-57), pero hay disponibles métodos de convergencia rápida [N. H. Wild, *Chem. Eng.*, **83**, 153-154 (abril 12, 1976)]. Para mayor sencillez, a menudo se utiliza la interpolación lineal.

Una comparación de los valores de (NPV) para un factor de descuento de 10%, indica con claridad que la depreciación de doble disminución es más ventajosa que la de línea recta y que la depreciación de suma de cifras anuales es más ventajosa que la de doble disminución. Sin embargo, se logra una importante ventaja con la demora del pago de impuestos durante un año, incluso con depreciación en línea recta.

Este ejemplo está simplificado. Se supone que el costo del capital de trabajo se paga en el año 0 y se recupera en el año 10. En la práctica, el capital de trabajo aumenta de acuerdo con el volumen de producción. Por tanto, puede haber un desembolso anual para capital de trabajo en cierto número de años posteriores al año 0. Excepto en los años en que hay pérdidas, esto se suele considerar como un gasto del proceso. En los años en que hay pérdidas, la aportación de efectivo para capital de trabajo se incluye en A_{IC} para ese año.

Análisis de las técnicas Los métodos para (NPV) y para (DCFRR) están basados en los flujos de efectivo descontados y, en ese sentido, son variantes del mismo método básico. Sin embargo, al clasificar proyectos diferentes sobre la base de rentabilidad, se pueden producir resultados distintos.

La tasa de retorno o de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) tiene la ventaja de que es exclusiva y se entiende con facilidad. Sin embargo, cuando se le utiliza por sí sola no da alguna indicación de la escala de operaciones. El (NPV) indica el rendimiento monetario, pero al contrario de (DCFRR) su valor depende del año base seleccionado para el cálculo. Se necesita información adicional antes de poder apreciar su importancia. Sin embargo, cuando una empresa piensa invertir en una cartera de proyectos, los (NPV) individuales tienen la ventaja de que son aditivos, cosa que no ocurre con las (DCFRR).

Cada vez se utiliza más la relación de la tasa de rendimiento o retorno del capital (CRR), que es el valor presente neto (NPV) dividido entre el desembolso acumulativo máximo o el desembolso neto máximo, $-(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}}$.

$$(\text{CRR}) = (\text{NPV})/(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}} \quad \text{para} \quad A_{CF} \leq 0 \qquad (25\text{-}56)$$

El desembolso neto máximo es muy importante, pues por muy rentable que sea el proyecto, todo será teoría si la empresa no puede reunir el dinero para emprender el proyecto.

Un cálculo del (NPV) o de la (DCFRR) no será mejor que la exactitud de los flujos de efectivo proyectados para toda la vida del proyecto. Por supuesto, es posible predecir los flujos de efectivo con más exactitud para los 2 o 3 años próximos que, digamos, para los 9 o 10 años venideros. Sin embargo, como los flujos de efectivo para los últimos años están descontados en mayor grado que para los primeros, ello tendrá menor efecto en el cálculo total. No obstante, la dificultad para predecir los flujos de efectivo para los últimos años y la falta de confianza inherente en estas predicciones son serias desventajas del método de (DCFRR). A este respecto, los (NPV) son más útiles porque se calculan para cada año de un proyecto. Por ello, un proyecto con (NPV) favorable para los primeros años, es prometedor.

Una forma de contrarrestar estas desventajas del método de (DCFRR) es hacer cálculos del tiempo requerido para llegar a ciertos valores de (DCFRR). Por ejemplo, ¿cuántos años se necesitarán para llegar a una (DCFRR) de 10, 15 o 20% anual, etc.? Aunque los cálculos de (DCFRR) mediante prueba y error y los del (NPV) son tediosos si se hacen manualmente, es fácil escribir programas para computadora adecuados para calculadoras programables comunes a efecto de facilitar los cálculos.

Es posible que algunos proyectos lleguen a una situación en la cual las reparaciones, reemplazos, etc., puedan exceder de la utilidad neta en un año en particular. En este caso, la curva de (DCFRR) o de (NPV) trazada contra el tiempo dará un valor máximo auténtico.

Cuando se evalúa mediante (NPV) y (DCFRR), es importante no tener en cuenta el pasado en los cálculos de rentabilidad. No se debe echar dinero bueno al malo. Sería ilógico seguir invirtiendo dinero en un proyecto cuando existe otro más rentable, aunque esta acción podría implicar el desmantelamiento de una costosa planta. Sin embargo, hay otros factores que, en un caso particular, pueden pesar más que los criterios estrictamente financieros.

No se debe aceptar un valor individual en un cálculo de rentabilidad sin un estudio adicional. Una consideración atinada de las curvas de flujo de efectivo acumulado y de flujo de efectivo descontado acumulado (Fig. 25-10), junto con la experiencia y el buen criterio, es la mejor forma de determinar los méritos financieros de un proyecto.

Cuando se estudian proyectos futuros, es posible que la alta gerencia requiera conocer la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado y el periodo de amortización o recuperación. Sin embargo, las personas encargadas de los cálculos también deberán suministrar a la gerencia lo siguiente:

Curva de flujo de efectivo descontado acumulado o de (NPV) para una tasa de descuento de 10% anual u otro costo de capital, después de impuestos, que se haya convenido.

Desembolso neto máximo, $(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}}$, para $A_{CF} \leq 0$

Punto de equilibrio descontado (DBEP)

Trazo de la relación de rendimiento de capital (CRR) contra el tiempo para la vida del proyecto con una tasa de descuento al costo del capital.

Número de años para llegar a tasas de rendimiento con flujo de efectivo descontado de, por ejemplo, 15 y 25% anual, respectivamente.

Las comparaciones sobre la base de tiempo se pueden resumir con lo siguiente:

Duración del proyecto
Punto de equilibrio (BEP)
Punto de equilibrio descontado (DBEP)
Periodo equivalente de inversión máxima (EMIP)
Periodo de recuperación de intereses (IRP)
Periodo de recuperación (PBP)

Las comparaciones sobre la base de efectivo se pueden resumir con lo siguiente:

Desembolso máximo acumulado para el proyecto, $(\Sigma A_{CF})_{\text{máx}}$, para $A_{CF} \leq 0$
Desembolso descontado máximo acumulado para el proyecto
Flujo anual neto de efectivo acumulado ΣA_{CF}
Flujo anual neto de efectivo descontado, ΣA_{DCF}, o valor presente neto (NPV)
Costo capitalizado, C_K

Las comparaciones sobre la base de intereses se pueden resumir como **1**) el valor presente neto (NPV) y **2**) la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) que, de acuerdo con las ecuaciones (25-53) y (25-54), se expresa formalmente como la tasa fraccionaria de intereses i que satisfaga la relación

$$(\text{NPV}) = \sum_{0}^{n} (A_{DCF})_n = 0 \qquad (25\text{-}57)$$

Al comparar la rentabilidad del proyecto, la clasificación sobre la base del valor presente neto (10% anual) puede diferir de la hecha con la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR). Considérense los datos para dos proyectos:

Costo de capital	Proyecto C	Proyecto D
i, %	(NPV) \$	(NPV) \$
4	+100 000	+62 000
8	+41 000	+28 000
12	−2 000	+10 000
16	−32 000	−4 000

Estos datos de (NPV) se trazan contra el costo del capital como se muestran en la figura 25-12. La (DCFRR) es el valor de i que satisface

:R), es importante no
tabilidad. No se debe
invirtiendo dinero en
inque esta acción po-
ıplanta. Sin embargo,
den pesar más que los

álculo de rentabilidad
nada de las curvas de
o descontado acumu-
en criterio, es la mejor
ın proyecto.
ıle que la alta gerencia
o de efectivo descon-
ión. Sin embargo, las
berán suministrar a la

lado o de (NPV) para
de capital, después de

$_{CF} \le 0$

(CRR) contra el tiem-
escuento al costo del

ento con flujo de efec-
l, respectivamente.
e pueden resumir con

MIP)

e pueden resumir con

ecto, $(\Sigma A_{CF})_{máx.}$ para

para el proyecto

$_{DCF}$, o valor presente

se pueden resumir co-
rendimiento con flujo
do con las ecuaciones
o la tasa fraccionaria

(25-57)

clasificación sobre la
de la hecha con la tasa
(DCFRR). Considé-

Proyecto D
(NPV) $
+62 000
+28 000
+10 000
−4 000

o del capital como se
alor de i que satisface

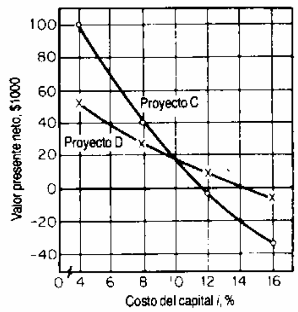


FIG. 25-12 Efecto del costo del capital sobre el valor presente neto.

la ecuación (25-51). De acuerdo con la figura 25-12, (NPV) = 0 con una (DCFRR) de 11.8% para el proyecto C y de 14.7% para el proyecto D. Por tanto, sobre la base de (DCFRR), el proyecto D es más rentable que el proyecto C.

El (NPV) del proyecto C es igual al del proyecto D con un costo de capital i = 9.8%. Si el costo de capital es mayor que 9.8%, el proyecto D tiene el (NPV) más alto y, por tanto, es el más rentable. Si el costo de capital es menor que 9.8%, el proyecto C tiene el (NPV) más alto y es el más rentable.

Beneficio de las entradas tempranas de efectivo Proporciona utilidades tener entradas de efectivo lo más temprano que sea posible y demorar los desembolsos lo más que se pueda.

Considérense los flujos anuales netos de efectivo después de impuestos, A_{CF}, para los proyectos E, F y G que aparecen en la tabla 25-5. Los flujos anuales de efectivos acumulados ΣA_{CF} y los flujos anuales de efectivo descontado acumulados ΣA_{DCF}, con el empleo de un descuento de 10% para estos proyectos también se enumeran en la tabla 25-5. Se verá que el flujo anual de efectivo acumulado para cada proyecto es de +$1000.

La (DCFRR) es la tasa de descuento que satisface la ecuación (25-57) en el último año del proyecto. Se puede obtener una aproximación a (DCFRR) para cada proyecto como sigue:

Para el proyecto E,

TABLA 25-5 Datos de flujo de efectivo para proyectos E, F y G

Año	A_{CF}, $	ΣA_{CF}, $	f_d	A_{DCF}, $	ΣA_{DCF} = (NPV), $
			Descontado al 10%		
			Proyecto E		
0	−5000	−5000	1.0000	−5000	−5000
1	+3000	−2000	0.90909	+2727	−2273
2	+2000	0	0.82645	+1653	−620
3	+1000	+1000	0.75131	+751	+131
			Proyecto F		
0	−5000	−5000	1.0000	−5000	−5000
1	+1000	−4000	0.90909	+909	−4091
2	+2000	−2000	0.82645	+1653	−2438
3	+3000	+1000	0.75131	+2254	−184
			Proyecto G		
0	−5000	−5000	1.0000	−5000	−5000
1	+2000	−3000	0.90909	+1818	−3182
2	+2000	−1000	0.82645	+1653	−1529
3	+2000	+1000	0.75131	+1503	−26

TABLA 25-6 Datos de flujo de efectivo para proyectos H e I

Año	A_{CF}, $	f_d	A_{DCF}, $	ΣA_{DCF} = (NPV), $
		Descontado al 10%		
		Proyecto H		
0	−50 000	1.0000	−50 000	−50 000
1	+10 000	0.90909	9 091	−40 909
2	+10 000	0.82645	8 265	−32 644
3	+10 000	0.75131	7 513	−25 131
4	+10 000	0.68301	6 830	−18 301
5	+10 000	0.62092	6 209	−12 092
6	+10 000	0.56447	5 645	−6 447
7	+10 000	0.51316	5 132	−1 315
8	+10 000	0.46651	4 665	+3 350
9	+10 000	0.42410	4 241	+7 591
		Proyecto I		
3	−40 000	0.75131	−30 052	−30 052
4	+20 000	0.68301	+13 660	−16 392
5	+20 000	0.62092	+12 418	−3 974
6	+20 000	0.56447	+11 289	+7 315
7	+20 000	0.51316	+10 263	+17 578
8	+20 000	0.46651	+9 330	+26 908
9	+20 000	0.42410	+8 482	+35 390

$$\Sigma A_{CF} = +\$1000 \text{ en el año 3 para } i = 0\%$$
$$\Sigma A_{DCF} = +\$131 \text{ en el año 3 para } i = 10\%$$
$$\Sigma A_{DCF} = \$0 \text{ en el año 3 para } i = (\text{DCFRR})$$

Por tanto:

$$1000/(1000 - 131) \approx (\text{DCFRR})/10$$
$$(\text{DCFRR}) \approx 11.5\%$$

En forma similar para el proyecto F,

$$1000/(1000 + 184) \approx (\text{DCFRR})/10$$
$$(\text{DCFRR}) \approx 8.4\%$$

En forma similar para el proyecto G,

$$1000/(1000 + 26) \approx (\text{DCFRR})/10$$
$$(\text{DCFRR}) \approx 9.7\%$$

En términos del valor presente neto (NPV), los proyectos por orden de mérito son E, G y F, con (NPV) de +$131, −$26 y −$184, respectivamente. En términos de (DCFRR), los proyectos por orden de mérito son también E, G y F con (DCFRR) de 11.5, 9.7 y 8.4%, respectivamente.

Cuándo se debe cancelar un proceso existente Supóngase que una empresa invierte $50 000 en un proceso de manufactura que tienen flujos anuales netos positivos, después de impuestos, A_{CF}, de $10 000 en cada año. Durante el tercer año de funcionamiento, hay disponible un proceso alterno. El nuevo proceso requeriría una inversión de $40 000 pero tendría flujos anuales netos positivos, después de impuestos, de $20 000 en cada año. El costo del capital es de 10% y se calcula que existirá mercado para el producto cuando menos otros seis años. ¿Debe la empresa continuar con el proceso existente (proyecto H) o debe cancelarlo y adoptar el nuevo proceso (proyecto I)?

Los flujos netos anuales de efectivo A_{CF} y el flujo de efectivo descontado anual acumulado ΣA_{DCF} para un factor de descuento de 10% se presentan en la tabla 25-6 para los dos proyectos. Al final del año 9, los valores presentes netos son:

(NPV) = +$35 390 para el proyecto I

(NPV) = +$7591 para el proyecto H

La diferencia es de +$27 779 que, en números, es mayor que el dinero perdido para el final del año 3 en el proyecto H. Por tanto, se debe cancelar el proyecto H y adoptar el nuevo proyecto I si sólo se van a considerar las razones económicas. Se han pasado por alto la recuperación del capital de trabajo y el costo del terreno, porque éste es el mismo para cada proyecto y aquél también favorecería al proyecto I.

Comparaciones incrementales Una empresa puede tener la elección de, por ejemplo, invertir $10 000 en el proyecto J, que dará una (DCFRR) de 16%, o $7000 en el proyecto K, que dará una (DCFRR) de 18%. ¿Debe gastar $10 000 en el proyecto J o gastar sólo $7000 en el proyecto K e invertir la diferencia de $3000 en otra cosa?

Ambos proyectos tienen duración de 10 años y flujos anuales de efectivos constantes positivos, A_{CF}, de $2069 para el proyecto J y de $1558 para el proyecto K. Los (NPV) correspondientes con un factor de descuento del 10% son +$2710 y +$2560, respectivamente. Estos datos se resumen como sigue:

	Proyecto J	Proyecto K	Proyecto (J − K)
A_{CF}, $, en año 0	−10 000	−7 000	−3 000
A_{CF}, $, en cada año 1 a 10	+2 069	+1 558	+511
(NPV), i = 10%, $	+2 710	+2 560	+150
(DCFRR), por ciento	16	18	12.4

A partir de las diferencias en los flujos de efectivo entre los proyectos, se puede indicar que la diferencia en la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) para el proyecto (J-K) es de 12.4%, que es bastante menor que para los proyectos J o K. Por ello, si los $3000 se pueden invertir para dar un rendimiento mayor del 12.4%, se debe preferir el proyecto K en vez del proyecto J.

Comparaciones sobre la base del costo capitalizado Una máquina en un proceso genera un flujo neto de efectivo positivo de $1000. Hay dos opciones disponibles: la máquina L que cuesta $2000 requiere reposición cada 4 años y la máquina M, que cuesta $3000 y requiere reposición cada 6 años. Ninguna de ellas tiene valor de desecho. El costo del capital es de 10%. ¿Qué máquina es la más rentable en el trabajo?

En este caso, las vidas de las máquinas no son iguales y la comparación se hace mejor sobre la base del costo capitalizado. Esto coloca las vidas sobre la misma base, que es un número infinito de años. Los flujos anuales netos de efectivo generados por cada máquina son iguales.

El costo capitalizado C_K de un equipo, que es parte del costo del capital fijo, C_{FC}, es la cantidad de capital requerido para tener la seguridad de que se renovará el equipo a perpetuidad. Para un equipo sin valor de desecho, el valor de C_K se expresa con:

$$C_K = C_{FC}\left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] \qquad (25\text{-}58)$$

Para la máquina L:

$$C_K = (\$2000)(3.15471) = \$6309.42$$

Para la máquina M:

$$C_K = (\$3000)(2.29607) = \$6888.21$$

Por tanto, la máquina L con su menor costo capitalizado es la más rentable para el trabajo.

Relación entre (PBP) y (DCFRR) Para el caso de un desembolso individual de capital a suma alzada, C_{FC}, que genera un flujo de efectivo anual constante, A_{CF}, en cada año subsecuente, el periodo para recuperación se indica con la ecuación

$$(\text{PBP}) = C_{FC}/A_{CF} \qquad (25\text{-}59)$$

si el valor de desecho del desembolso de capital se puede considerar como cero.

En este caso simplificado, el valor presente neto (NPV) después de n años con el dinero invertido a una tasa fraccional de interés compuesto después de impuesto i, se expresa con la ecuación

$$(\text{NPV}) = C_{FC} - A_{CF}F_n \qquad (25\text{-}60)$$

en donde

$$F_n = \sum_{1}^{n} \frac{1}{(1+i)^n}$$

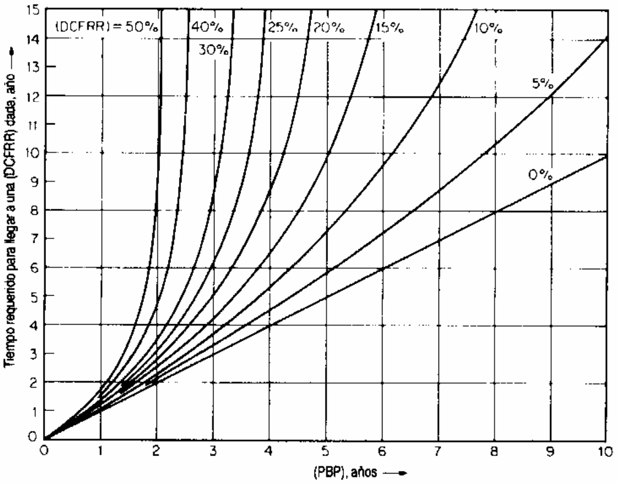


FIG. 25-13 Relación entre periodo de recuperación y tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado.

guales y la compara-
zado. Esto coloca las
aito de años. Los flu-
náquina son iguales.
s parte del costo del
lo para tener la segu-
l. Para un equipo sin

(25-58)

).42

3.21

apitalizado es la más

so de un desembolso
iera un flujo de efec-
ente, el periodo para

(25-59)

se puede considerar

to (NPV) después de
l de interés compues-
ión

(25-60)

Cuando (NPV) = 0, el valor de i dado por la ecuación (25-60) es la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) y en este caso se pueden combinar las ecuaciones (25-59) y (25-60) para dar:

$$(\text{PBP}) = F_n \qquad (25\text{-}61)$$

En la figura 25-13 se muestra un trazo de la ecuación (25-61) en la forma del número de años n requeridos para alcanzar cierta (DCFRR) para un periodo dado de recuperación (PBP). Esta figura es una modificación de los trazos publicados por A. G. Bates [*Hidrocarbon Process.*, **45,** 181-186 (marzo, 1966)], C. Estrup [*Br. Chem. Eng.*, **16,** 171 (febrero-marzo 1971)] y por F. A. Holland y F. A. Watson [*Process Eng. Econ.*, **1**, 293-299 (diciembre, 1976)].

En el caso limitativo en el que n se aproxima a infinito, la ecuación (25-61) se puede escribir como

$$(\text{DCFRR})_{\text{máx}} = 1/(\text{PBP}) \qquad (25\text{-}62)$$

que significa, por ejemplo, que si el periodo de recuperación es de cuatro años, la tasa máxima posible de rendimiento con flujo de efectivo descontado que se puede lograr es del 25%. La (DCFRR) correspondiente para (PBP) = 10 años es de 10%.

Las ecuaciones (25-59), (25-60), (25-61) y (25-62) se pueden utilizar tal como se exponen para evaluar el gasto en medidas de conservación de energía, dado que se ahorra una cantidad constante de energía en cada año siguiente al desembolso del capital. Sin embargo, los flujos anuales de efectivo, A_{CF}, correspondientes a los ahorros de energía permanecen constantes sólo si no hay inflación o si los valores monetarios se corrigen a su poder adquisitivo en la fecha del desembolso de capital.

Análisis de sensibilidad Un estudio económico debe señalar con exactitud los aspectos más susceptibles al cambio. Se pueden predecir más fácilmente los gastos que las ventas o utilidades. Se pueden hacer cálculos con exactitud razonable de los costos del capital y del procesamiento. Sin embargo, casi siempre, los errores en estos cálculos tienen un menor efecto que los cambios en el precio de venta, volúmenes de ventas y en los costos de materia prima y distribución.

Cualquiera de los siguientes factores puede influir en los precios de venta y de materias primas: descuentos y bonificaciones, disponibilidad de sustitutos, precios por contrato, reglamentos gubernamentales, calidad y forma de los materiales y la competencia. Cualquiera de los siguientes factores puede influir en el volumen de ventas: nuevos usos para el producto, nuevos mercados, publicidad, calidad, exceso de capacidad, sustitución por otro producto, competencia y la oportunidad del ingreso al mercado.

Los costos de distribución dependen de la ubicación de la planta, estado físico del material (líquido, gaseoso o sólido), la naturaleza del material (corrosivo, explosivo, inflamable, perecedero o tóxico), las tarifas de flete y los costos de mano de obra. Cualquiera de los siguientes factores puede influir en los costos de distribución: nuevos métodos para movimiento de materiales, reglamentos de seguridad, convenios de productividad, salarios diarios, sistemas de transporte, sistemas de almacenamiento, calidad, pérdidas y efectos de la temporada.

Vale la pena elaborar gráficas y trazar curvas que muestren el efecto de las variaciones en los costos y los precios sobre la rentabilidad. Este procedimiento se llama **análisis de sensibilidad**. Su finalidad es determinar a cuáles factores es más sensible la rentabilidad de un proyecto. Siempre se debe efectuar el análisis de sensibilidad para observar el efecto de las desviaciones de los valores esperados.

Durante muchos años las empresas y las naciones han tenido que afrontar el problema de la inflación o del valor decreciente del dinero. Los costos, en particular los de mano de obra, tienden a aumentar cada año. Si no se tiene en cuenta esta tendencia al predecir los futuros flujos de efectivo se puede llegar a serios errores y cálculos engañosos de la rentabilidad.

Otro factor importante es la tendencia a la caída de los precios de los productos cuando aumenta el volumen total nacional o internacional de producción. Los precios de venta pueden caer en un 20% cuando se duplica el volumen de producción.

Ningún cálculo de rentabilidad será mejor que la exactitud inherente de los datos.

Ejemplo 3 Se describe un proyecto con los siguientes datos. Los ingresos por ventas anuales y los gastos anuales totales en un periodo de 10 años aparecen en las tres primeras columnas de la tabla 25-4. La inversión en capital fijo, C_{FC}, es de $1 millón. Los componentes de la planta tienen un valor de salvamento

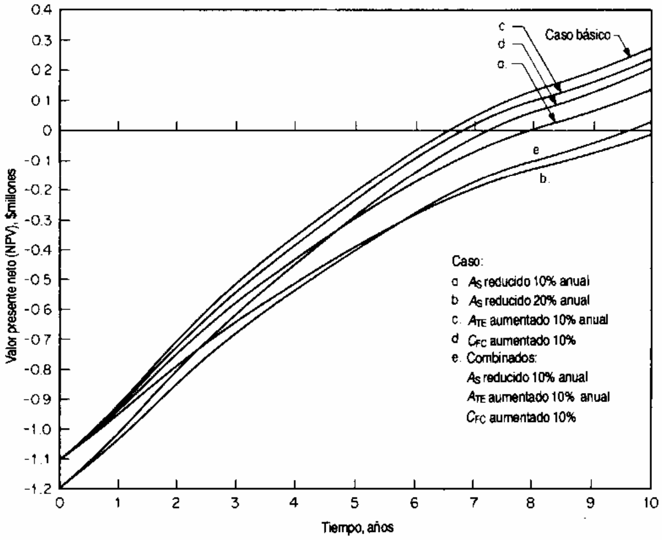


FIG. 25-14 Valor presente neto contra el tiempo, mostrando los efectos de cambios desfavorables en el flujo de efectivo.

cero. El capital de trabajo, C_{WC}, es de \$90 000 y el costo del terreno, C_L, es de \$10 000. No hay deducciones de impuestos excepto la depreciación, es decir, A_A es de cero. La tasa fraccional de impuestos t es 0.50. Para este proyecto, el valor presente neto con un factor de descuento de 10% y depreciación en línea recta o directa, fue de \$276 210 y la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado fue de 16.4% anual.

Se utilizarán estos datos y la información de la tabla 25-4 como caso básico y se calcularán, con depreciación en línea recta, el valor presente neto (NPV) con un factor de descuento del 10% y la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) con las siguientes situaciones

Caso	Modificación
a	Ingreso A_S reducido en un 10% anual
b	Ingreso A_S reducido en un 20% anual
c	Gastos totales A_{TE} aumentados en 10% anual
d	La inversión en capital fijo aumenta en 10%
e	A_S se reduce 10% anual, A_{TE} aumenta 10% anual y C_{FC} aumenta en 10%

Los resultados se presentan en las figuras 25-14 y 25-15 y en las tablas 25-7 y 25-8.

Curvas de aprendizaje Lo usual es aprender a base de experiencia. En consecuencia, el tiempo requerido para producir un artículo, el número de lotes de desperdicio, el costo por unidad de producción, etc., tienden a disminuir de acuerdo con el número de unidades producidas. Las relaciones se expresan, para el caso ideal, mediante

$$Y = KX^N \tag{25-63}$$

en donde Y = costo promedio acumulado, tiempo de producción, etc., por unidad
X = producción acumulada, unidades
K = valor real de la primera unidad producida
N = pendiente del trazo rectilíneo de Y contra X en papel logarítmico

La curva particular de aprendizaje se suele caracterizar por el porcentaje de reducción en el valor promedio acumulado, Y, cuando se duplica el número de unidades, X. De esta definición se desprende que:

$$N = \log(\text{característica}/100)/\log 2 \tag{25-64}$$

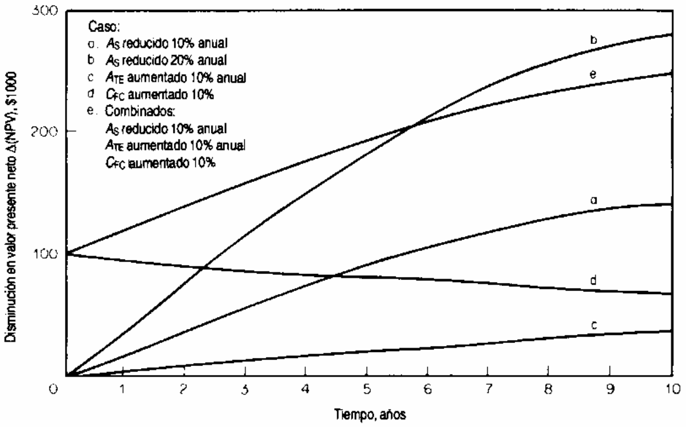


FIG. 25-15 Disminución en el valor presente neto contra el tiempo debido a cambios desfavorables en los flujos de efectivo.

TABLA 25-7 Flujos anuales de efectivo, depreciación en línea recta y factor de descuento de 10% cuando los ingresos se reducen en 10% anual

	Caso básico					ΔA_{DCF},	Δ(NPV),	(NPV)
Año	A_S, \$	A_{TE}, \$	(NPV), \$	ΔA_S, \$	f_d	\$	\$	Reducido, \$
0	0	0	−1 100 000	0	1.0000	0	0	−1 100 000
1	400 000	100 000	−918 180	40 000	0.90909	18 180	18 180	−936 360
2	500 000	100 000	−711 570	50 000	0.82645	20 660	38 840	−750 410
3	500 000	110 000	−527 500	50 000	0.75131	18 780	57 620	−585 120
4	500 000	120 000	−363 580	50 000	0.68301	17 070	74 690	−438 270
5	520 000	130 000	−211 460	52 000	0.62092	16 140	90 830	−302 290
6	520 000	130 000	−73 160	52 000	0.56447	14 680	105 510	−178 670
7	520 000	140 000	+50 000	52 000	0.51316	13 340	118 850	−68 850
8	390 000	140 000	+131 640	39 000	0.46651	9 100	127.950	+3 690
9	350 000	150 000	+195 250	35 000	0.42410	7 420	135 370	+59 880
10	280 000	160 000	+276 210	28 000	0.38554	5 390	140 760	+135 450

A_S = ingreso básico por ventas anuales antes de impuestos.
A_{TE} = gastos totales anuales básicos antes de impuestos.
(NPV) = valor prresente neto básico déspues de impuestos.
ΔA_S = disminución en ingresos anuales.
f_d = factor de descuento al 10%.
ΔA_{DCF} = disminución en flujo de efectivo neto descontado con t = 0.5.
Δ(NPV) = $\Sigma\Delta A_{DCF}$ = disminución en valor presente neto.
(NPV) reducido = ΣA_{DCF} = valor presente neto reducido déspues de impuestos.

TABLA 25-8 Resumen de resultados del análisis de sensibilidad

Caso	(NPV), \$ $i = 10\%$	(DCFRR), %
Caso básico	276 210	16.4
A_S reducido 10% anual	135 450	12.9
A_S reducido 20% anual	−5 330	9.8
A_{TE} aumentado 10% anual	238 430	15.0
C_{FC} aumentado 10%	206 890	14.0
Combinados:		
A_S reducido 10% anual		
A_{TE} aumentado 10% anual	28,420	10.6
C_{FC} aumentado 10%		

El costo C_{ME} de la última unidad de un grupo que haga llegar la producción acumulada a X unidades es, según la ecuación (25-63), de

$$c_{ME} = K[X^{N+1} - (X - 1)^{N+1}] \qquad (25\text{-}65)$$

Estos costos unitarios o el tiempo requerido para producir la última unidad, etc., se pueden trazar en coordenadas cartesianas en contra del número de unidades producidas, a fin de dar una norma o estándar contra la cual se puedan juzgar el rendimiento de un nuevo empleado, una nueva máquina, etc. En la figura 25-16 se muestra ese trazo para el ejemplo 4.

En general, habrá disponibles datos de costos para unidades múltiples. Es típico calcular el costo de producción para una semana o de una orden específica y se obtiene un costo promedio por unidad. Este valor promedio $\bar{Y}$ para el lote se debe trazar contra el valor $\bar{X}$ de la curva de aprendizaje correspondiente, calculado con la ecuación (25-66):

$$\bar{X}^N = (X_2^{N+1} - X_1^{N+1})/(X_2 - X_1) \qquad (25\text{-}66)$$

en donde X_1 y X_2 son la producción acumulada antes y después del lote. Esta forma de la ecuación es útil cuando sólo se conoce el historial previo del proceso, mediante los números de serie o de otra forma.

Se puede ajustar una línea recta a los pares de datos (X, Y) o $(\bar{X}, \bar{Y})$ cuando se trazan en papel logarítmico, donde se pueda leer la pendiente N y la intercepción $\log K$ con $X = 1$. Como opción, se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para calcular los valores de K y N que permitan el mejor ajuste a los datos disponibles.

Se verá que un valor de $N = 0$ correspondiente a una característica de 100% de la curva de aprendizaje, implica que el valor de Y es independiente de X. Esto implicaría que no fue posible el aprendizaje con la experiencia y que por tanto corresponde a un proceso de diseño óptimo o a uno en el cual los costos se determinan con factores externos. En forma similar, un valor de $N = -1$ que corresponde a la curva de aprendizaje de 50%, implica que el costo de producción es inversamente proporcional al número producido, lo cual es absurdo. Los proyectos que tienen características de menos del 70% son imprácticos. Las características bajas son típicas de un ingreso apresurado a un mercado en un intento por apoderarse de él. Las características tiende.. a aumentar con la experiencia, de modo que los proyectos establecidos y maduros es posible que tengan características alrededor del 95%. Es poco probable que se logren características cercanas al 100% debido a los factores aleatorios, como cambios en el personal, accidentes, demoras en el suministro, etc. En la figura 25-17 se presenta un caso práctico típico y se puede ver que la curva tiene un punto de inflexión, pero en un momento dado se convierte en una línea más o menos recta con menor pendiente que la de la curva de aprendizaje definida en forma convencional. En algún punto, es útil cambiar a la ecuación de esta línea para un proyecto maduro.

Los cambios importantes en las operaciones, como la introducción de nuevo equipo, el influjo de gran número de trabajadores sin experiencia o una reducción temporal en la capacidad del personal después de un largo cierre de la planta, pueden producir un aumento repentino en todas las curvas de promedio acumulado. La forma más sencilla de manejarlo, cuando se tiene el siguiente costo exacto, es deducir el valor de X obtenido de la curva del actual obtenido en la práctica y utilizar ese valor como una corrección constante de X hasta que se llega a la siguiente interrupción en la curva. Si recurren las causas de esos escalonamientos, el tamaño del escalón a menudo puede estar relacionado con una causa particular. En tales casos, se puede utilizar el cambio estimado en el escalón para las predicciones hasta que se obtienen los siguientes valores determinados con exactitud.

La curva de aprendizaje tiene ya muchas aplicaciones y se pueden encontrar otras nuevas. Se requiere cuidado al aplicar las técnicas para tener la seguridad de que es posible que ocurra el aprendizaje. Al hacer las proyecciones de precios, etc., se deben excluir las partidas poco comunes, como el costo de preparación especial de herramientas o re-

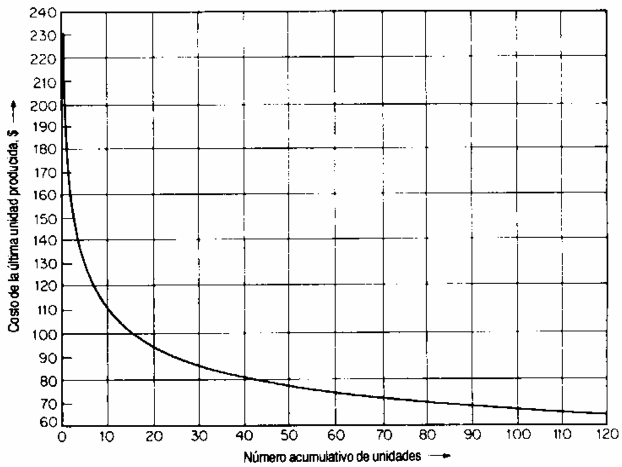


FIG. 25-16 Trazo cartesiano de la curva de aprendizaje.

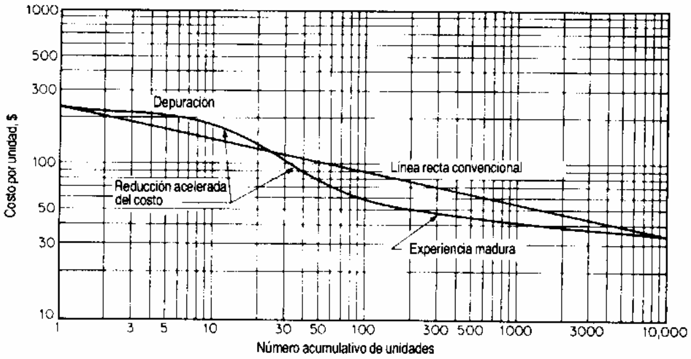


FIG. 25-17 Trazo logarítmico de la curva de aprendizaje.

arreglos de la planta, de los costos de producción utilizados para establecer la curva de aprendizaje. En tiempos de inflación hay que corregir los costos de acuerdo con los efectos de ella, en la forma que se describirá más adelante. Los tiempos de producción o los porcentajes de desperdicio no se alteran con las asignaciones de costos o la inflación y pueden constituir mejores normas de rendimiento, en su caso. Sin embargo, la curva de aprendizaje se requiere a menudo cuando se preparan cotizaciones para corridas de producción por lotes, en particular cuando habrá una competencia fuerte. En tales casos, el costo promedio de la corrida de producción $\bar{Y}$, entre los totales acumulados de producción de X_1 y X_2, se puede calcular con la ecuación (25-67) cuando se conoce el costo promedio acumulado anterior Y_1:

$$\bar{Y} = Y_1[(X_2/X_1)^{N+1} - 1]/[(X_2/X_1) - 1] \qquad (25\text{-}67)$$

En la ingeniería de procesos se pueden producir a menudo unidades fraccionarias, con lo cual se puede considerar que la curva de aprendizaje es continua. Cuando sólo se pueden producir cantidades discretas de unidades, la curva de aprendizaje es estrictamente un histograma. A fin de tener esto en cuenta, es suficiente aumentar el valor de X en 0.50 de unidad antes de aplicar la ecuación anterior. La diferencia es importante con valores pequeños de X, como los que se pueden utilizar para las estimaciones iniciales de K y N. Conforme madura el proyecto, es preferible utilizar la ecuación tal como está, pues el costo de la primera unidad K es totalmente ideal. Por supuesto, los cambios tecnológicos mayores se deben considerar como el inicio de un nuevo proyecto.

R. B. Jordan (*How to Use the Learning Curve*, Materials Management Institute, Boston, 1965) hace un amplio comentario de los usos de la curva de aprendizaje y presenta muchas tablas de factores. Los usos que menciona incluyen el cálculo de los costos de arranque, determinación de requisitos de mano de obra, establecimiento de objetivos de costo de fábrica, verificación del adelanto del adiestramiento de empleados, las decisiones de fabricar o comprar, como ayuda en las negociaciones de compra y como auxiliar para establecer un precio de venta.

Ejemplo 4 El costo de un lote inicial de 21 unidades, sin incluir los costos de herramientas especiales y preparación, fue, en promedio, de $120 por unidad. El costo promedio del siguiente lote de 80 unidades fue de $75.81. Establézcase la curva de aprendizaje implícita en estos datos y, por tanto, calcúlese el costo promedio probable de las siguientes 50 unidades. Se establecerá también la curva de costo unitario que se utilizará como control durante las órdenes de trabajo posteriores.

Si las unidades del lotes son susceptibles de subdivisiones continuas, se procede como sigue. Se sustituyen los valores dados del costo promedio acumulado Y y de la producción acumulada X para el primer lote en la ecuación (25-63) para obtener, al tomar los logaritmos en cada lado:

$$\log 120 = \log K + N \log 21$$

El costo del primer lote es 120 × 21 = $2520, y el del segundo lote es 75.81 × 80 = $6065. Por tanto, el costo total de las primeras 101 unidades es de $8585, con un costo promedio acumulado por unidad de $85. Se hace la sustitución como antes para obtener

$$\log 85 = \log K + N \log 101$$

Con estas ecuaciones se ve que K = $234.15 y N = − 0.2196. Esta línea está trazada en la figura 25-18.

Con la ecuación (25-64) se ve que el valor de la característica de esta curva de aprendizaje = 100 antilog (− 0.2196 log 2) = 85.0%. De acuerdo con la ecuación (25-65), el costo de producción de la tercera unidad es

$$c_{ME} = (\$234.15)(3^{0.7804} - 2^{0.7804}) = \$149.70$$

Los valores calculados en esta forma están trazados en las figuras 25-16 y 25-18. Se verá que después de alrededor de 10 unidades, la última curva queda paralela con la curva de costo promedio acumulado y que los valores de Y son $(N + 1)$ multiplicados por los obtenidos con la última curva.

Dado que el costo promedio acumulado, Y_2, de las primeras 101 unidades fue de $85, se ve con la ecuación (25-67) que el costo promedio del tercer lote de 50 unidades, que hace el total acumulado de 151, se exprese con:

$$\bar{Y}_3 = (\$85)[(151/101)^{0.7804} - 1]/[(151/101) - 1]$$
$$= \$63.30 \text{ por unidad}$$

Esta cifra se puede utilizar como guía de costos al cotizar el trabajo.

Si las unidades de producción no se pueden subdividir, el procedimiento es similar, excepto que todos los valores de X se aumentan en 0.50 de unidad al establecer las curvas. Los resultados no tienen una diferencia significativa como para que sea importante para fines de estimaciones.

A los costos anteriores hay que agregarles cualesquiera costos unitarios omitidos de aquéllos en los cuales el aprendizaje pueda aportar mejoras. Por lo general, serán gastos indirectos y cargos específicos al proyecto, tales como el costo unitario de herramientas especiales, matrices, etc.

Riesgo e incertidumbre La tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) y el valor presente neto (NPV) para futuros proyectos nunca se pueden predecir en forma absoluta, porque los datos de flujo de efectivo de cada proyecto están sujetos a incertidumbre. Por tanto, al expresar los valores predichos de (DCFRR) y de (NPV) para proyectos, también es deseable incluir una medida de confianza en las predicciones.

Por ejemplo, para un proyecto particular se puede calcular que hay una posibilidad de 90% de que (DCFRR) sea mayor del 10%, una posibilidad de 50% de que sea mayor de 16% y una posibilidad de sólo 10% de que sea mayor de 20%. La administración es la que decide si se sigue o no adelante con el proyecto, pero los datos de las probabilidades aportan información deseable para la decisión.

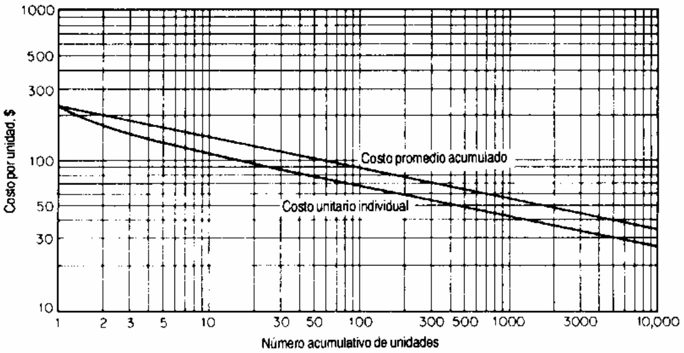


FIG. 25-18 Efecto del aprendizaje sobre el costo promedio de un producto.

El cálculo de probabilidades requiere el empleo de métodos estadísticos, que tienen un papel cada vez más importante para la toma de decisiones.

Predicciones con datos limitados Las predicciones de futuros precios y volúmenes de ventas, etc., suelen estar basadas en una cantidad muy limitada de datos respecto a eventos anteriores. Además, quizá no sea conveniente utilizar toda la población de eventos pasados aunque estuviera disponible. Una estadística es una medida, basada en información limitada de una muestra, que permite calcular el parámetro correspondiente de la población.

El valor medio $\bar{x}$ de una propiedad x, es una estadística basada en una muestra de n componentes, definido por

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + x_3 + \cdot \cdot \cdot x_n)/n \qquad (25\text{-}68)$$

La media $\bar{x}$ es la estadística correspondiente a los parámetros de la población μ y es el promedio aritmético de todos los componentes de la población. En muchos casos, no todos los valores de x serán diferentes. En tales circunstancias, la ecuación (25-68) se puede escribir como

$$\bar{x} = [\Sigma x_i f(x_i)]/[\Sigma f(x_i)] \qquad (25\text{-}69)$$

en donde $f(x_i)$ es la frecuencia con la que ocurre un valor particular x_i. A menudo es conveniente dividir la frecuencia de la ocurrencia entre el número total de componentes o conceptos. En este caso, $f(x_i)$ se convierte en la frecuencia relativa de ocurrencia del valor x_i y $\Sigma f(x_i) = 1$.

Los valores de x pueden ser discretos o continuos. El número de ventas de, por ejemplo, automóviles en cualquier día debe ser un entero. Si una empresa vende 4 automóviles, representa todos los posibles valores de x en el rango de 3.5 a 4.5.

Cuando x representa una cantidad o parámetro variable continua, en ocasiones es conveniente tomar la frecuencia total o relativa de ocurrencias dentro de un rango dado de valores de x. Después, estas frecuencias se pueden trazar en contra de los valores medios de x para formar un histograma. En este caso, la ordenada debe ser la frecuencia por unidad de anchura x. Esto hace que el área debajo de cualquier barra sea proporcional a la probabilidad de que el valor de x esté en el rango dado. Si la frecuencia relativa se traza como ordenada, la suma de las áreas debajo de las barras es la unidad.

Si x es una variable continua y los rangos de intervalo se hacen cada vez más pequeños, en un momento dado se tendrá una curva lisa. El área debajo de esa curva entre x_1 y x_2 representa la probabilidad de que un concepto seleccionado en forma aleatoria tendrá un valor de x que se encuentre en el rango de x_1 a x_2. Ésta es la información que se desea.

Los datos disponibles mediante la experiencia se pueden utilizar para generar curvas de distribución de frecuencia. Es esencial que una empresa tenga un eficiente servicio de inteligencia comercial para evaluar las condiciones del mercado.

La exactitud de los pronósticos de ventas también se puede aumentar con un estudio cuidadoso de registros de ventas anteriores, tendencias de los precios, etc. Sin embargo, la incertidumbre de una estimación va aumentando conforme el estimado se proyecta más y más hacia el futuro.

Las estimaciones o cálculos de los ingresos por ventas y otros tipos de pronósticos suelen estar basados en las opiniones de peritos, que deben ser capaces de calcular los valores máximo, mínimo o los más posibles o modales de una cantidad. El valor modal no se encuentra por necesidad a la mitad entre los valores mínimo y máximo, porque muchas distribuciones tienen sesgamiento. Se puede solicitar a un perito que calcule la probabilidad de ocurrencia de ciertos valores en cada lado del modo. Cuando se consulta a los peritos por separado, el procedimiento se llama **método de Delfos**. En términos estrictos, este método requiere que la opinión de cada perito sea evaluada por un coordinador, que hace una retroalimentación de los resultados para ver si la opinión de un perito se modifica con las de otros. Este proceso se repite hasta que se llega a un acuerdo. En la práctica, el procedimiento es demasiado tedioso para llevarlo a cabo más de una vez.

Es útil comparar las predicciones pasadas de cada perito con los resultados obtenidos en la práctica. Esta información permite que el coordinador pondere las opiniones. Cuando los peritos trabajan en estrecha cooperación, no es posible evitar alguna colusión. En este caso, es mejor llegar a una sola opinión conjunta mediante una discusión abierta y franca. Éste es el método cuya traducción libre del inglés familiar sería "junta de cerebros". Su principal desventaja es que alguien con influencia por el puesto que ocupa podría dar un peso indebido a una o más opiniones.

Las opiniones de los peritos, obtenidas en la forma que sea, constituyen una base para trazar una curva de distribución de frecuencias o de probabilidades. Si se traza la frecuencia relativa como ordenada, el área total debajo de la curva es la unidad. El área debajo de la curva entre dos valores de la cantidad o parámetro es la probabilidad de que un valor seleccionado en forma aleatoria quede en el rango entre los dos valores de la cantidad. Estas probabilidades son simples estimaciones y su confiabilidad depende de los conocimientos y práctica de los pronosticadores.

La (DCFRR) y el (NPV) estimados son funciones del ingreso acumulativo estimado por ventas anuales, ΣA_S, de el costo o gasto anual total acumulado estimado ΣA_{TE} y del costo estimado del capital fijo para la planta C_{FC}. El ingreso anual por ventas para cada año es, a su vez, el producto del precio y del volumen de ventas. Inicialmente, es deseable seleccionar estos valores con las curvas de distribución de ΣA_S, ΣA_{TE} y C_{FC}, que permiten calcular la (DCFRR) y el (NPV) máximos y mínimos.

Si los valores máximos de (DCFRR) y (NPV) no son aceptables para la empresa hay que rechazar el proyecto de inmediato. Si los valores mínimos de (DCFRR) y de (NPV) son aceptables, hay que efectuar una evaluación detallada. Si los valores máximos, de (DCFRR) y de (NPV) son aceptables pero no los mínimos, se debe continuar con el estudio de factibilidad.

Modelos matemáticos para las curvas de distribución Se han desarrollado modelos matemáticos para ajustar o encajar las diversas curvas de distribución. Es muy poco posible que cualquier curva de distribución de frecuencia obtenida en la práctica ajuste exactamente en una curva trazada con cualquier modelo matemático. No obstante, las aproximaciones son de gran utilidad, particularmente en vista de las inexactitudes inherentes en los datos prácticos. Las distribuciones más comunes son la binominal, la de Poisson y la normal o gaussiana.

Una curva de distribución normal es acampanada (véase sección 2). La curva obedece a la relación

$$f(x) = \frac{\exp - [(x - \mu)^2/2\sigma^2]}{\sigma(2\pi)^{0.5}} \qquad (25\text{-}70)$$

en donde σ se conoce como la desviación estándar real. La desviación estándar s^* de una muestra se expresa con

$$s^* = \left[\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 f(x_i)}{\Sigma f(x_i) - 1}\right]^{0.5} \qquad (25\text{-}71)$$

La desviación estándar s^* de la muestra corresponde a la desviación estándar real σ para toda la población, en la misma forma que la media $\bar{x}$ de la muestra corresponde al promedio aritmético μ para toda la población. La ecuación (25-70) se puede escribir en una forma más compacta como

$$f(z) = [\exp(-z^2/2)/[(2\pi)^{0.5}] \qquad (25\text{-}72)$$

en donde el puntaje estándar z es

$$z = (x - \mu)/\sigma \qquad (25\text{-}73)$$

El área debajo de la curva de $f(z)$ es la unidad si la abscisa se extiende desde infinito negativo hasta infinito positivo. El área debajo de la curva entre z_1 y z_2 es la probabilidad de que un valor de x seleccionado en forma aleatoria esté en el rango de z_1 y z_2, pues ésta es la frecuencia relativa con la cual se representaría ese rango de valores en un número infinito de pruebas.

Un evento que por fuerza ocurrirá tiene una probabilidad de la unidad. Un evento que definitivamente no ocurrirá tiene una probabilidad de cero.

La ecuación (25-72) se puede integrar entre ciertos límites para determinar la probabilidad de que un valor aleatorio se encuentre entre los límites seleccionados. Hay amplias tablas de $f(z)$ y de la integral asociada (véase Sec. 1).

Se puede utilizar una curva de distribución de frecuencia para trazar una curva de frecuencia acumulada. Es la curva de máxima importancia para las decisiones de una empresa y se puede trazar a partir de una curva de distribución de frecuencia normal (véase Sec.2). La curva acumulativa representa la probabilidad de que un valor z aleatorio tenga un valor de, por ejemplo, z_1 o menor.

Si una propiedad o variable c es función de varias otras variables: x_1, x_2, etc., se puede escribir en la forma de

$$c = \phi(x_1, x_2, \ldots x_n) \qquad (25\text{-}74)$$

Si cada x es una variable independiente con distribución normal, entonces:

$$\sigma_c^2 = \left(\frac{\partial c}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \cdots \left(\frac{\partial c}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2 \qquad (25\text{-}75)$$

en donde σ_c es la desviación estándar de la variable c, y σ_1, σ_2, etc., son las desviaciones estándar de las variables x_1, x_2, etc.

Muchas de las distribuciones que ocurren en situaciones de negocios no son simétricas sino sesgadas y la curva de distribución normal no es un buen ajuste. Sin embargo, cuando los datos están basados en estimaciones de futuras tendencias, suele ser aceptable la exactitud de la aproximación normal. Esto ocurre en particular cuando aumenta el número de variables componentes x_1, x_2, etc., en la ecuación (25-74). Aunque la distribución de las variables individuales, x_1, x_2, etc., pueda estar sesgada, la distribución de la propiedad o variables c tiende a aproximarse a la distribución normal.

Considérese un evento que puede tener uno de dos resultados. Puede ocurrir con la probabilidad p_1 o puede no ocurrir con la probabilidad p_2. Como son eventos exclusivos y la probabilidad de que ocurra algo es de la unidad, se verá que

$$p_1 + p_2 = 1 \qquad (25\text{-}76)$$

En el supuesto de que no esté implicado ningún proceso de aprendizaje (de modo que los resultados previos no influyan en el valor de p_1) la probabilidad de x éxitos en n pruebas se expresa con los términos que contienen p_1^x en el desarrollo de la binomial

$$(p_1 + p_2)^n = p_1^n + \cdots \frac{n!}{x!(n - x)!} p_1^x p_2^{(n-x)} \cdots + p_2^n \qquad (25\text{-}77)$$

en donde x y n son enteros y $x!$ (que se lee x factorial) es el producto de todos los enteros desde la unidad hasta x.

Ejemplo 5 Si se lanza un dado común con las caras numeradas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, la probabilidad de que cualquier número determinado esté hacia arriba es 1/6. Si se lanza el dado dos veces seguidas, entonces la probabilidad de que ocurra una secuencia dada de números, por ejemplo el 5 seguido por el 6, es de (1/6) (1/6) = 1/36. La probabilidad de que un número particular ocurra 0, 1, 2, 3 o 4 veces en cuatro tiradas de un dado (o en una tirada simultánea de cuatro dados) se expresa con los términos sucesivos de la ecuación (25-77) desarrollada como:

$$\left(\tfrac{5}{6} + \tfrac{1}{6}\right)^4 = (1)\left(\tfrac{5}{6}\right)^4\left(\tfrac{1}{6}\right)^0 + (4)\left(\tfrac{5}{6}\right)^3\left(\tfrac{1}{6}\right)^1 + (6)\left(\tfrac{5}{6}\right)^2\left(\tfrac{1}{6}\right)^2 + (4)\left(\tfrac{5}{6}\right)^1\left(\tfrac{1}{6}\right)^3$$
$$+ (1)\left(\tfrac{5}{6}\right)^0\left(\tfrac{1}{6}\right)^4 = 0.4823 + 0.3858 + 0.1157 + 0.0154 + 0.0008 = 1$$

La distribución del número de éxitos está sesgada hacia los números bajos. En particular, sólo hay una ligerísima probabilidad de "salir a mano" si se apuesta dinero y de que un número determinado ocurra más de una vez en cuatro tiros. No se puede lograr aproximación a esa distribución tan asimétrica con la curva de distribución normal.

Sin embargo, cuando se aumenta el número de tiradas dará por resultado totales cercanos a la distribución normal. Este hecho se puede utilizar para aproximarse a esa distribución sin el enorme trabajo de cálculo requerido por el empleo de la ecuación (25-77).

Los posibles valores de un total de cuatro tiradas del dado son enteros de 4 a 24 y, por tanto, representan valores en el rango o intervalo de 3.5 a 24.5. El valor $\bar{x}$ de la media del rango se expresa por la ecuación (25-68) como $\bar{x} = (3.5 + 24.5)/2 = 14.0$.

La probabilidad acumulada de que una variable con distribución normal quede dentro de 4 desviaciones estándar de la media es de 0.49997. Por tanto, hay más de 99.99% (0.49997/0.50000) de que un valor aleatorio esté dentro de $\pm 4\sigma$ de la media. Para fines prácticos, se puede considerar que σ es 1/8 del rango de certidumbre y que se puede obtener la desviación estándar:

$$s^* \cong (24.5 - 3.5)/8 = 2.625$$

Con el empleo de la ecuación (25-73) el puntaje estándar se convierte en:

$$z = (x - \mu)/\sigma \cong (x - \bar{x})/s^*$$

Para un puntaje total de 4 (es decir, $x = 4$), el puntaje estándar aproximado es de $z = (4 - 14)/2.625 = -3.81$. Ya que la curva normal es asimétrica en torno a $z = 0$, la altura de la ordenada con $z = -3.81$ es la misma que con $z = +3.81$. En las tablas de valores de probabilidades acumuladas de la distribución normal (véase la Sec. 2), se verá que la altura de la ordenada es de 0.0003 en unidades de $1/\sigma$. La frecuencia relativa de la ocurrencia de 4 es, por tanto, alrededor de 0.0003/2.625 = 0.0001.

Este concepto se pue
tribuciones de probabili
siones.

Ejemplo 6 Una tien
producto. El gerente cre
quiera, pero no puede se
entregan la mercancía u
primer pedido a fin de la
Ya que el producto se
rias es de −0.5 a +25.5
ventas será:

La desviación estánd

Con lo anterior, se p
para las ventas diarias
deseada a la derecha d
bilidades es de 0.95 − 0.

Por tanto, para tener 9
comprar 19 unidades.

Si el valor de n es
cerca de cero, se pue
mial con

La aproximación
mayor parte de los f

Ejemplo 7 Los re
1 artículo al día y que s
bilidad de vender entr
En un año de 50 sem
es de 100 artículos. L
p_1 = 100/300 = 1/3, y
ción (25-78),

El rango integral de
x desde 89.5 hasta 12
La probabilidad ac
tras que un puntaje est
anuales en el rango de

Hay ocasiones e
entero de eventos
el número de autom
mero de fugas en u
la distribución de P
la cual la probabilid
se expresa por

en donde x es un e
un parámetro del s
Conforme aume
distribución norma

e c, y σ_1, σ_2, etc., son
tc.
situaciones de nego-
distribución normal
tos están basados en
table la exactitud de
r cuando aumenta el
la ecuación (25-74).
les, x_1, x_2, etc., pueda
variables c tiende a

los resultados. Puede
con la probabilidad
d de que ocurra algo

(25-76)

proceso de aprendi-
yan en el valor de p_1)
con los términos que

$\cdots + p_2^n$ (25-77)

ial) es el producto de

s numeradas 1, 2, 3, 4,
inado esté hacia arriba
la probabilidad de que
l 5 seguido por el 6, es
ero particular ocurra 0,
a tirada simultánea de
de la ecuación (25-77)

$^2(¼)^2 + (4)(¾)^1(¼)^3$
0154 + 0.0008 = 1

a los números bajos. En
r a mano" si se apuesta
una vez en cuatro tiros.
asimétrica con la curva

dará por resultado tota-
de utilizar para aproxi-
requerido por el empleo

dado son enteros de 4 a
lo de 3.5 a 24.5. El valor
como $\bar{x} = (3.5 + 24.5)/2$

istribución nor..al que-
0.49997. Por tanto, hay
orio esté dentro de $\pm 4\sigma$
ue σ es 1/8 del rango de
lar:

dar se convierte en:

estándar aproximado es
simétrica en torno a $z =$
e con $z = +3.81$. En las
tribución normal (véase
03 en unidades de $1/\sigma$.
r tanto, alrededor de

Este concepto se puede utilizar para traducir la opinión Délfica u otras a distribuciones de probabilidad y, por tanto, a un útil instrumento para toma de decisiones.

Ejemplo 6 Una tienda que abre 5 días a la semana va a promover un nuevo producto. El gerente cree que no se venderán más de 5 unidades en un día cualquiera, pero no puede ser más preciso respecto al probable patrón de ventas. Le entregan la mercancía una vez a la semana. ¿Qué cantidad debe ordenar para el primer pedido a fin de lograr un 95% de certidumbre de satisfacer la demanda?

Ya que el producto se vende por unidades, el posible rango de ventas semanarias es de −0.5 a +25.5 unidades. Por tanto, la media de la distribución de las ventas será:

$$\bar{x} \cong [25.5 - (-0.5)]/2 = 13$$

La desviación estándar en este ejemplo será:

$$s^* \cong [25.5 - (-0.5)]/8 = 3.25$$

Con lo anterior, se puede derivar la distribución de frecuencia aproximada para las ventas diarias con las ecuaciones (25-70), (25-72) o (25-73). El área deseada a la derecha de $z = 0$ para la curva de distribución normal de probabilidades es de $0.95 - 0.50 = 0.45$. Para este valor, el puntaje estándar es $z = 1.645$.

$$x \cong 13 + (1.645)(3.25) = 18.35$$

Por tanto, para tener 95% de certidumbre de satisfacer la demanda, se deben comprar 19 unidades.

Si el valor de n en la ecuación (25-77) es grande y ni p_1 ni p_2 están cerca de cero, se puede tener una aproximación a la distribución binomial con

$$z = \frac{x - np_1}{\sqrt{np_1p_2}} \qquad (25\text{-}78)$$

La aproximación de la ecuación (25-78) es bastante buena para la mayor parte de los fines, si np_1 y np_2 son mayores de 5.

Ejemplo 7 Los registros de un negocio indican que nunca se vende más de 1 artículo al día y que se pueden esperar 2 ventas cada semana. ¿Cuál es la probabilidad de vender entre 90 y 120 artículos en un año de 300 días?

En un año de 50 semanas de 6 días, el valor medio o esperado de la distribución es de 100 artículos. La probabilidad de venta de un artículo en un día dado es $p_1 = 100/300 = 1/3$, y de que no haya alguna venta es $p_2 = 2/3$. Según la ecuación (25-78),

$$z = \frac{x - (300)(1/3)}{\sqrt{(300)(1/3)(2/3)}} = \frac{x - 100}{8.165}$$

El rango integral de 90 a 120 artículos contiene todos los posibles valores de x desde 89.5 hasta 120.5. Para $x = 89.5$, $z = -1.286$ y para $x = 120.5$, $z = 2.511$.

La probabilidad acumulada de un puntaje estándar de 1.286 es de 0.11, mientras que un puntaje estándar de 2.511 es 0.99. Entonces, la probabilidad de ventas anuales en el rango de 90 a 120 artículos es de $(0.99 - 0.11) = 0.88$ o sea 88%.

Hay ocasiones en que la medición de la frecuencia es un número entero de eventos en un segmento dado de un continuo, por ejemplo, el número de automóviles que pasan por un lugar dado en 1 h o el número de fugas en una longitud dada de una manguera. En estos casos, la distribución de frecuencia correcta es la distribución de Poisson, en la cual la probabilidad que ocurran x eventos por unidad de un continuo se expresa por

$$f(x) = \lambda^x e^{-\lambda}/x! \qquad (25\text{-}79)$$

en donde x es un entero, e es la base de los logaritmos naturales y λ es un parámetro del sistema $\lambda = \mu = \sigma^2$.

Conforme aumenta λ, la distribución de Poisson se aproxima a la distribución normal, con la relación

$$z = (x - \lambda)/\sqrt{\lambda} \qquad (25\text{-}80)$$

Cuando el valor de p_1 está muy cerca de cero en la ecuación (25-77), de modo que la ocurrencia del evento sea rara, se puede hacer una aproximación a la distribución binomial mediante la distribución de Poisson, con $\lambda = np_1$ cuando $n > 50$ mientras que $np_1 < 5$.

Ejemplo 8 Se estima que la probabilidad diaria de un desperfecto o avería en una línea de producción que trabaja en forma continua 300 días al año es de 1%, sobre la base del funcionamiento conocido. Calcúlese la probabilidad de 4 o más desperfectos para el año próximo.

Para $n = 300$ y $p_1 = 0.01$, $\lambda = np_1 = 3 < 5$, entonces con la ecuación (25-79) se encuentra que la probabilidad de un desperfecto es:

$$f(0) = (3)^0e^{-3}/0! = 1/e^3 = 0.0498$$

En forma similar.

Desperfectos	Probabilidad
1	$f(1) = (3)^1e^{-3}/1! = 0.1496$
2	$f(2) = (3)^2e^{-3}/2! = 0.2240$
3	$f(3) = (3)^3e^{-3}/3! = 0.2240$

Dado que algo debe ocurrir, la probabilidad de 4 o más desperfectos es:

$$1 - 0.0498 - 0.1496 - 0.2240 - 0.2240 = 0.3526$$

Una simple prueba indicará que es mucho más fácil hacer el cálculo precedente que cuando se emplea directamente la ecuación (25-77).

Muchas veces, el valor necesario de λ se puede establecer como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 9 En un periodo de producción de 100 días ocurrieron 0, 1, 2, 3 y 4 desperfectos de máquina en un solo día en 41, 37, 15, 6 y 1 ocasiones, respectivamente. Ajústese una distribución de Poisson a los datos y calcúlese el número máximo de desperfectos de máquina que es posible ocurran en un día de un año de 300 días.

Con la ecuación (25-69) se encuentra que el número medio de fallas es

$$\bar{x} = \frac{0(41) + 1(37) + 2(15) + 3(6) + 4(1)}{41 + 37 + 15 + 6 + 1} = 0.89$$

La desviación estándar se encuentra con la ecuación (25-71):

$$s^* = \left[\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 f(x_i)}{\Sigma f(x_i) - 1}\right]^{0.5}$$

Los pasos para calcular el numerador y el denominador de esta ecuación son tabulados a continuación:

$(x_i - \bar{x})^2$	$f(x_i)$	$(x_i - \bar{x})^2 f(x_i)$
$(0 - 0.89)^2$	41	32.48
$(1 - 0.89)^2$	37	0.45
$(2 - 0.89)^2$	15	18.48
$(3 - 0.89)^2$	6	26.71
$(4 - 0.89)^2$	1	9.67
	$\Sigma(x_i - \bar{x})^2 f(x_i)$	= 87.79
	$\Sigma f(x_i) - 1$	= 99

Por tanto, $s^* = (87.79/99)^{0.5} = 0.9417$

La distribución de Poisson es un buen ajuste porque

$$\lambda = \mu \cong \bar{x} = 0.8900$$

y también $\qquad \lambda = \sigma^2 \cong (s^*)^2 \cong 0.8868$

Con la ecuación (25-79) se encuentra que la distribución de Poisson es:

$$f(x) = [(0.89)^x e^{-0.89}]/x!$$

Al sustituir los valores correspondientes de x para este ejemplo en la ecuación precedente, se encuentra $f(0) = 0.4107$, $f(1) = 0.3655$, $f(2) = 0.1627$, $f(3) = 0.0483$, $f(4) = 0.0107$, $f(5) = 0.0019$ y $f(6) = 0.0003$. Por tanto, para los 300 días, el número máximo de fallas esperadas en un día es de 5, porque $(300)f(6) = 0.09$ ocurrencia.

En muchas aplicaciones de negocios, la ecuación (25-74) se puede reducir a la relación lineal

$$c = k_1x_1 + k_2x_2 + \cdots + k_nx_n \quad (25\text{-}81)$$

en donde las k's son constantes. Entonces, la ecuación (25-75) se convierte en:

$$\sigma_c^2 = k_1^2\sigma_1^2 + k_2^2\sigma_2^2 + \cdots + k_n^2\sigma_n^2 \quad (25\text{-}82)$$

Por otra parte, para una función de producto tal como

$$c = x_1x_2 \quad (25\text{-}83)$$

la ecuación (25-75) se puede escribir en la forma de

$$\sigma_c^2/c^2 = \sigma_1^2/x_1^2 + \sigma_2^2/x_1^2 \quad (25\text{-}84)$$

La tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) y el valor presente neto (NPV) son funciones, entre otros factores, de los ingresos acumulados por ventas anuales ΣA_{TE} y del costo del capital fijo de la planta, C_{FC}.

La ecuación (25-75) se puede escribir para (DCFRR) y (NPV) como:

$$\sigma^2_{(DCFRR)} = \left[\frac{\partial(DCFRR)}{\partial \Sigma A_S}\right]^2 \sigma^2_{\Sigma AS} + \left[\frac{\partial(DCFRR)}{\partial \Sigma A_{TE}}\right]^2 \sigma^2_{\Sigma ATE} + \left[\frac{\partial(DCFRR)}{\partial C_{FC}}\right]^2 \sigma^2_{CFC} \quad (25\text{-}85)$$

$$\sigma^2_{(NPV)} = \frac{\partial(NPV)^2}{\partial \Sigma A_S}\sigma^2_{\Sigma AS} + \frac{\partial(NPV)^2}{\partial \Sigma A_{TE}}\sigma^2_{\Sigma ATE} + \frac{\partial(NPV)^2}{\partial C_{FC}}\sigma^2_{CFC} \quad (25\text{-}86)$$

Los ingresos por ventas anuales A_S de un producto con volumen anual de producción R y precio de venta de c_s por unidad de producción es

$$A_S = Rc_S \quad (25\text{-}87)$$

La ecuación (25-84) se puede escribir como

$$\sigma^2_{AS} = (A_S/R)^2\sigma^2_R + (A_S/c_s)^2\sigma^2_{c_s} \quad (25\text{-}88)$$

Holland y coautores [F. A. Holland, F. A. Watson y J. K. Wilkinson, *Chem. Eng.*, **81**, 105-110 (enero 7, 1974)] presentaron un amplio ejemplo en que se ilustra el empleo de las ecuaciones (25-81) hasta (25-86), para establecer la probabilidad de alcanzar un valor dado del valor presente neto o menor del mismo en un año particular de un proyecto dado. El resultado se muestra en la figura 25-19.

Quienes toman las decisiones prefieren, a menudo, contar con gráficas que muestren la probabilidad de alcanzar un valor mayor que un valor dado. Para obtener esas curvas, por lo general, se resta de 100% la probabilidad de alcanzar un valor dado o menor. La figura 25-20 se obtuvo en esta forma y muestra la probabilidad de lograr una (DCFRR) mayor que un valor dado.

Método de Monte Carlo En este método se utilizan números aleatorios. Se puede emplear una computadora para generar números seudoaleatorios en el rango de 0 a 1. Se describirá el empleo de los números aleatorios en la curva de distribución de frecuencia de un factor particular, por ejemplo, el volumen de ventas. Cada valor del volumen de ventas tiene cierta probabilidad de ocurrencia. La probabilidad acumulada de alcanzar ese valor (o uno menor) es un número en el rango de 0 a 1. Entonces, se puede utilizar un número aleatorio en el mismo rango para seleccionar un valor aleatorio del volumen de ventas.

Se pueden obtener valores aleatorios de los otros factores en la misma forma. Después, se pueden combinar para dar valores aleatorios de (DCFRR) y (NPV) y, a su vez, utilizarlos para trazar las curvas de probabilidad acumulada de (DCFRR) y (NPV). Se puede necesitar la computadora para efectuar entre 10000 y 50000 cálculos.

El empleo del método de Monte Carlo en la evaluación de un proyecto lo describieron Holland y coautores [F. A. Holland, F. A. Watson y J. K. Wilkinson, *Chem. Eng.*, **81**, 76-79 (febrero 4, 1974)]. Las curvas de probabilidad acumulada para (DCFRR) y (NPV) nunca pueden ser más exactas que las opiniones en que se basan; se puede obtener exactitud comparable con el empleo de curvas en forma de S y con un número pequeño de cálculos.

Curvas en forma de S K. D. Tocher (*The Art of Simulation*, rev. ed., English Universities Press, London, 1967) describió una forma muy completa para la generación de números aleatorios y seudoaleatorios y su empleo en un gran número de procesos simulados. También consideró las técnicas de muestreo para las diversas distribuciones estadísticas y el diseño de procesos simulados. Se verá que las curvas de distribución acumulada son en forma de S y Tocher (*op. cit.*, p. 16) recomendó como ecuación general para esas curvas:

$$x = a + by + cy^2 + d(1-y)^2 \ln y + ey^2 \ln(1-y) \quad (25\text{-}89)$$

en la cual x varía desde $-\infty$ hasta $+\infty$ cuando y varía de 0 a 1. La curva de frecuencia subyacente que corresponde a la ecuación (25-89) es

$$\frac{1}{p(x)} = \frac{dx}{dy} = b + 2cy + d(1-y)\left(\frac{1-y}{y} - 2\ln y\right) + ey\left[2\ln(1-y) - \frac{y}{1-y}\right] \quad (25\text{-}90)$$

Si es necesario, se puede mejorar el ajuste si se aumenta el orden de la parte polinomial de la ecuación (25-89), con lo que este método constituye uno de gran flexibilidad para la simulación de una curva de frecuencia acumulada. El método se puede ampliar a las curvas en forma de J, que se caracterizan por una frecuencia máxima con $x = 0$ y frecuencia decreciente para valores crecientes de x, porque se considera que existe el reflejo de la curva en el eje y. La curva individual máxima resultante se puede muestrear en forma correcta con el método de Monte Carlo, si se divide a la mitad la escala vertical y sólo se consideran los valores absolutos de x.

Cuando los datos no requieren la exactitud de las ecuaciones (25-89) o (25-90), serán suficientes, por lo general, curvas más sencillas si se supone que la distribución de frecuencia tendrá un valor individual máximo.

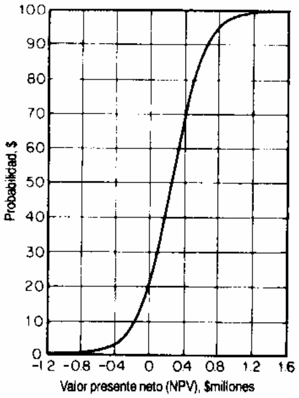


FIG. 25-19 Probabilidad de un valor presente neto determinado o menor para un proyecto.

) y (NPV). Se puede
00 y 50000 cálculos.
valuación de un pro-
Holland, F. A. Watson
4, 1974)]. Las curvas
V) nunca pueden ser
puede obtener exac-
na de S y con un nú-

t of Simulation, rev.
describió una forma
atorios y seudoalea-
simulados. También
as distribuciones es-
erá que las curvas de
cher (*op. cit.*, p. 16)
vas:

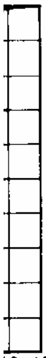
$(1 - y)$ (25-89)

ría de 0 a 1. La curva
uación (25-89) es

$- 2 \ln y)$ (25-90)

aumenta el orden de
lo que este método
ación de una curva de
ar a las curvas en for-
máxima con $x = 0$ y
le x, porque se consi-
. La curva individual
correcta con el méto-
ala vertical y sólo se

e las ecuaciones (25-
curvas más sencillas
tendrá un valor indi-



eterminado o menor para

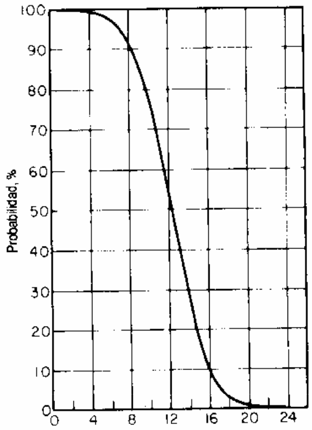


FIG. 25-20 Probabilidad de una tasa de rendimiento determinada o mayor con flujo de efectivo descontado para un proyecto.

Considérese un producto que se vende exclusivamente sobre la base de la recomendación personal. El volumen de ventas dependerá de la cantidad de personas que ya lo hayan comprado. Por tanto, al principio, las ventas aumentarán en forma exponencial. En un momento dado, se saturará el mercado y sólo se harán compras para reposición. Si se puede suponer que la curva de frecuencia sea simétrica en torno a un solo valor máximo, entonces la curva de distribución acumulada se conoce como curva de logística y se define por la ecuación (25-91):

$$y = c/[1 + a \exp(-bx)] \qquad (25\text{-}91)$$

en la cual y varía entre cero y c y x va de $-\infty$ a $+\infty$. Aunque sólo tres constantes explícitas en la ecuación (25-91), hay otras dos constantes implícitas debido a la elección de cero como el límite inferior de y y el punto de inflexión con $y = c/2$. La ecuación (25-91) se suele utilizar en pronósticos de ventas, en cuyo caso y es la demanda de ventas y x es el tiempo. Si ya existe esa curva, el valor de c se puede leer como la asíntota superior y a y b se pueden obtener con el empleo de una variable auxiliar T, en donde:

$$T = x_2\,(\text{at } y = r_2c) - x_1\,(\text{at } y = r_1c) \qquad (25\text{-}92)$$

$$b = [\ln(1/r_1 - 1) - \ln(1/r_2 - 1)]/T \qquad (25\text{-}93)$$

$$a = (1/r_1 - 1)\exp(bx_1) \qquad (25\text{-}94)$$

o bien $\quad a = (1/r_2 - 1)\exp(bx_2)$

Si los valores de a obtenidos con la ecuación (25-94) tienen una diferencia importante, la curva de logística no es una representación adecuada de los datos.

Ejemplo 10 Se derivará la curva de logística que representa las distribuciones de frecuencia acumulada de la curva de distribución normal definida por las ecuaciones (25-72) y (25-73). En este caso, y varía entre una probabilidad acumulada de cero y la unidad conforme z varía desde $-\infty$ hasta $+\infty$. Dado que el límite superior es la unidad, $c = 1$. En la tabla 25-9 se puede leer el área debajo del lado derecho de la curva entre $z = 0$ y $z = z$. Dado que la curva de frecuencia es simétrica en torno a la media, también es el área entre $z = 0$ y $z = -z$. Por ello, el área debajo de la curva de frecuencia, que representa la probabilidad acumulada es 0.5000 con $z = 0$ y el percentil 80, para el cual el área es de 0.8000, corresponde al valor $z = 0.842$. Se sustituyen estos valores en las ecuaciones (25-92) hasta (25-94) para dar

$$T = 0.842 - 0.000 = 0.842$$

$$b = [\ln(1/0.50 - 1) - \ln(1/0.80 - 1)]/0.842 = 1.6464$$

$$a = 1.0000 \text{ o } 1.0000$$

De la ecuación (25-91), la curva de logística correspondiente es

$$y = [1 + \exp(-1.6464z)]^{-1}$$

La función de frecuencia acumulada calculada con esta simple expresión se compara contra el valor preciso en la tabla 25-9.

Cuando una curva de frecuencia acumulada se puede representar en forma satisfactoria con una curva de logística, la curva de frecuencia subyacente se puede obtener por diferenciación de la ecuación (25-91) como

$$p(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{abc \exp(-bx)}{[1 + a\exp(-bx)]^2} \qquad (25\text{-}95)$$

La función de densidad de probabilidad para la curva de distribución normal calculada con la ecuación (25-95) por el empleo de los valores de a, b y c obtenidos en el ejemplo 10, también se puede comparar con los valores precisos de la tabla 25-9. En esos casos simétricos se debe esperar el mejor ajuste cuando se utiliza la mediana o percentil 50 x_M en conjunción con el cuartil inferior o percentil 25 x_L o con el cuartil superior o percentil 75 x_U. Estas estadísticas se citan con frecuencia y la determinación de los valores de a, b y c mediante el empleo de x_M con x_L y con x_U es una indicación de la simetría de la curva. Cuando la concordancia es razonable, se deben utilizar los valores de la media de b determinados en esa forma para calcular el valor correspondiente de a.

En la práctica, la mayor parte de las curvas de distribución no son simétricas en torno a la mediana sino que tienen sesgamiento inherente. El efecto de una campaña de publicidad suele ser aumentar el volumen de ventas en los primeros años. También puede aumentar el grado de demanda madura del producto, pero esta demanda madura debe ser asintótica con un límite superior finito de ventas c. Esa curva tiene sesgamiento positivo porque $(x_M - x_L) < (x_U - x_M)$. Se puede tener una

TABLA 25-9 Datos para curva de distribución normal

Puntaje estándar	Ordenada de la curva de distribución normal, $p(z)$		Área debajo de la curva, probabilidad acumulada $y = \int_0^z p(z)\,dz$	
z	Precisa	Estimada	Precisa	Estimada
0.000	0.3989	0.4116	0.0000	0.00000
0.100	0.3970	0.4088	0.03983	0.04017
0.200	0.3910	0.4006	0.07926	0.08158
0.253	0.3864	0.3943	0.10000	0.10265
0.300	0.3814	0.3875	0.11791	0.12103
0.400	0.3683	0.3700	0.15542	0.15894
0.500	0.3521	0.3491	0.19146	0.19492
0.524	0.3478	0.3436	0.20000	0.20323
0.600	0.3332	0.3255	0.22575	0.22866
0.700	0.3123	0.3003	0.25804	0.25996
0.800	0.2897	0.2744	0.28814	0.28870
0.842	0.2798	0.2634	0.30000	0.30000
0.900	0.2661	0.2484	0.31594	0.31484
1.000	0.2420	0.2231	0.34134	0.33840
1.200	0.1942	0.1761	0.38493	0.37822
1.282	0.1953	0.1587	0.40000	0.39194
1.400	0.1497	0.1358	0.41234	0.40929
1.600	0.1109	0.1029	0.44520	0.43303
1.645	0.1032	0.0964	0.45000	0.43752
1.800	0.0790	0.0769	0.46407	0.45092
2.000	0.0540	0.0569	0.47725	0.46418
2.500	0.0175	0.0260	0.49379	0.48395
3.000	0.0044	0.0116	0.49865	0.49289
4.000	0.0001	0.0023	0.49997	0.49862
00	0.0000	0.0000	0.50000	0.50000

aproximación a esta situación con la curva de Gompertz definida por la ecuación (25-96):

$$\ln y = \ln c - a \exp(-bx) \qquad (25\text{-}96)$$

que tiene su punto de inflexión con 0.3679 c. En términos de los cuartiles superior e inferior y de la mediana,

$$b = 0.8794/(x_U - x_M) \qquad (25\text{-}97)$$

$$b = 0.6931/(x_M - x_L) \qquad (25\text{-}98)$$

$$a = 0.6931 \exp(bx_M) \qquad (25\text{-}99)$$

Para evaluar si el ajuste de Gompertz con la curva es adecuado, se comparan los valores de b calculados con las ecuaciones (25-97) y (25-98) y, si son adecuados, se puede utilizar el valor promedio de b en la ecuación (25-99) para calcular el valor correspondiente de a que asegure un ajuste en la mediana y una exactitud razonable en el intervalo práctico, que es más importante, dentro de un par de desviaciones estándar en cada lado de la mediana.

La curva de distribución de frecuencia subyacente de la curva de Gompertz se puede obtener por la diferenciación de la ecuación (25-96) para dar

$$p(x) = dy/dx = yab \exp(-bx) \qquad (25\text{-}100)$$

Las curvas de logística y de Gompertz tienen la forma general mostrada en la figura 25-19. Se pueden adaptar para ajustar con curvas de la forma general mostrada en la figura 25-20 con unas pequeñas "manipulaciones" matemáticas. Por ejemplo, considérese la relación entre activo y pasivo circulantes, que se menciona en los informes de crédito de Dun & Bradstreet. Un valor típico para las empresas químicas en Estados Unidos podría ser $x_L = 1.82$, $x_M = 2.59$ y $x_U = 3.25$. Primero, se verá que $(x_M - x_L) > (x_U - x_M)$. Entonces, esta curva tiene sesgamiento negativo o tiene forma de S inversa y la curva de logística no es adecuada; la ecuación de Gompertz tampoco se puede emplear en forma directa. Sin embargo, está claro que si esa curva se traza "de cabeza" y hacia atrás, la curva transformada tendrá sesgamiento positivo. En términos matemáticos, esto equivale a intercambiar los límites superior e inferior y considerar que la variable dependiente es $(c - y)$. En el caso presente, los valores citados representan las probabilidades acumuladas de que la relación entre circulantes sea menor que el valor mencionado y, por tanto, que el valor de y esté entre cero y la unidad; por tanto, $c = 1$. En la curva transformada, $x_L = 3.25$, $x_M = 2.59$ y $x_U = 1.82$. Por ello, de acuerdo con la ecuación 25-97,

$$b = 0.8794/(1.82 - 2.59) = -1.1421$$

y según la ecuación (25-98)

$$b = 0.6931/(2.59 - 3.25) = -1.0502$$

La variación está dentro de un límite de 5% del valor medio de $b = -1.0961$ y la curva transformada debe tener suficiente exactitud para muchos fines. Según la ecuación (25-99)

$$a = 0.6931 \exp[(-1.0961)(2.59)] = 0.04054$$

Por tanto, según la ecuación (25-96), la ecuación de la curva transformada es

$$\ln(1 - y) = -0.04054 \exp(1.0961x)$$

Dado que $d(1 - y) = -dy$, la correspondiente curva de frecuencia subyacente es, según la ecuación (25-100):

$$p(x) = +0.0444(1 - y) \exp(1.0961x)$$

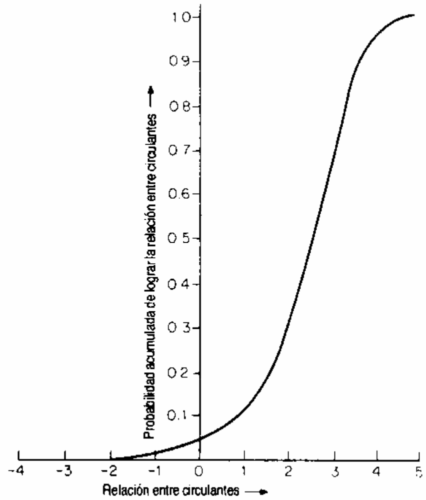


FIG. 25-21 Probabilidad acumulada de una relación determinada entre circulantes.

Los valores de y y de $p(x)$ calculados a partir de las dos ecuaciones anteriores, están trazados en las figuras 25-21 y 25-22.

En todas las curvas en forma de S, el rango de x es desde $-\infty$ hasta $+\infty$, con lo que siempre hay una posibilidad finita de que ocurran valores negativos de x. En el caso presente, la definición de la relación entre activo y pasivo circulantes hace que los valores de x menores de cero no tengan significado. En un caso dado, pueden ser

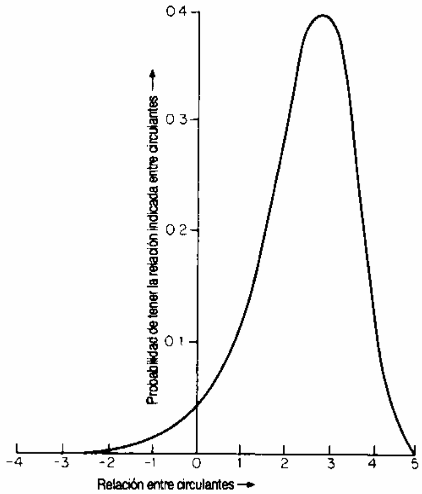


FIG. 25-22 Probabilidad de una relación determinada entre circulantes.

TABLA 25-10 D

Parámetro	Bajo
A_S	1 126 24
A_{TE}	−471 69
C_{FC}	−900 60
C_{WC}	−61 44

tolerables los error acumulada implica Se puede demost B-76 (1968)] que p y la desviación está ciones de un valor b alto. Se sugiere, por en cuanto a las prob es en el cual hay una que el bajo y una pr el valor alto. Estos Para el nivel de con nes disponibles son

$\bar{x}$ = (valor bajo) +

s° = [(valor alto)-

Sobre esta base, método paramétric *Prog.*, **72**, 73-78 (n

Ejemplo 11 Con que los datos básicos bilidad de 10% de que 5%. En la misma for A_{TE} se considera que Se considera que los arriba de la cifra base insignificantes.

Con un costo de c flujos de efectivo. Po = $754 716, $\Sigma A_D f_d$ = es de 50%; entonces, meros conceptos son bajo descontado y el d más probables se res puestos dan un valor Una reducción de 2 en $\Sigma A_s f_d$ por abajo del $563 120. El efecto, d a (NPV) es (1 − 0.50)($281 560 = $1 126 valores en la tabla 25 El valor medio de alto, modal y bajo, m no coincidirán la me la media para obtene estándar de cada dist de que el (NPV) de l de la media o del m todas las constantes la desviación estánd estándar individuale Si se supone que l rar de inmediato la puntaje estándar de 4 y uno de −4 a una pr dad y cero, respectiv 4 corresponde a un (− 4 a un (NPV) de límites de confianza curva de la figura 2

Como se ha dic luaciones del rang

TABLA 25-10 Datos para análisis del riesgo

	(NPV), $ anuales				
Parámetro	Bajo	Modal	Alto	Mediana	Desviación estándar
A_S	1 126 240	1 407 800	1 478 190	1 355 008	132 811
A_{TE}	−471 698	377 358	−358 490	−396 226	−42 720
C_{FC}	−900 603	−692 772	−658 133	−736 070	−91 498
C_{WC}	−61 446	−61 446	−61 446	61 446	0

tolerables los errores de alrededor de 4% en la curva de probabilidad acumulada implicada por este factor.

Se puede demostrar [J. J. Molder y E. G. Rogers, *Manage. Sci.*, **15**, B-76 (1968)] que para eventos continuos es posible calcular la media y la desviación estándar de una distribución sesgada a partir de estimaciones de un valor bajo, de un valor muy posible o modal y de un valor alto. Se sugiere, porque es difícil hacer juicios subjetivos muy atinados en cuanto a las probabilidades, que el rango más posible de ser exacto es en el cual hay una probabilidad de 10% de que exista un valor menor que el bajo y una probabilidad de 10% de que haya un valor mayor que el valor alto. Estos valores suelen implicar una distribución sesgada. Para el nivel de confianza sugerido de un 80%, las mejores estimaciones disponibles son:

$$\bar{x} = (\text{valor bajo}) + [(2)(\text{valor modal})] + (\text{valor alto}) \qquad (25\text{-}101)$$

$$s^* = [(\text{valor alto}) - (\text{valor bajo})]/2.65 \qquad (25\text{-}102)$$

Sobre esta base, un sistema alterno para el análisis del riesgo es el método paramétrico [D. O. Cooper y L. B. Davidson, *Chem. Eng. Prog.*, **72,** 73-78 (noviembre, 1976)].

Ejemplo 11 Considérese el proyecto presentado en la tabla 25-4. Se estima que los datos básicos representan los valores más posibles y que hay una probabilidad de 10% de que A_S se reducirá en más de 20% o que aumentará en más de 5%. En la misma forma, los niveles bajo y alto con una probabilidad de 10% de A_{TE} se considera que están 5% por abajo y 25% por arriba de las cifras de base. Se considera que los valores bajo y alto de C_{FC} están 5% por abajo y 30% por arriba de la cifra base; se considera que los cambios en los otros parámetros son insignificantes.

Con un costo de capital i de 10%, se pueden descontar y sumar los diversos flujos de efectivo. Por tanto, para los casos básicos, $\Sigma A_S f_d$ = $2 815 600, $\Sigma A_{TE} f_d$ = $754 716, $\Sigma A_D f_d$ = $614 457 y $\Sigma C_{WC} f_d$ = $61 446. El impuesto sobre la renta es de 50%; entonces, los flujos de efectivo después de impuestos de los tres primeros conceptos son (1 − 0.50) de las sumas calculadas antes. El capital de trabajo descontado y el desembolso para capital fijo no son grabables. Estos valores más probables se resumen en la tabla 25-10 y después del ajuste según los impuestos dan un valor modal de (NPV) de $276 224.

Una reducción de 20% en A_s cada año, dará por resultado una disminución de 20% en $\Sigma A_S f_d$ por abajo del valor modal, es decir, una reducción de (0.20)($2 815 600) = $563 120. El efecto, después de impuestos, de esta reducción sobre la aportación a (NPV) es (1 − 0.50) ($563 120) = $281 560, lo que hace el valor bajo $1 407 800 − $281 560 = $1 126 240 o en forma más directa (0.8)($1 407 800). Los otros valores en la tabla 25-10 están calculados en forma similar.

El valor medio de cada una de las distribuciones se obtiene con estos valores alto, modal y bajo, mediante la ecuación (25-101). Si la distribución es sesgada, no coincidirán la media y el modo. Sin embargo, se pueden sumar los valores de la media para obtener el valor medio de (NPV) que es de $161 266. La desviación estándar de cada distribución se calcula mediante la ecuación (25-75). El hecho de que el (NPV) de la media o del modo sea la suma de los valores individuales de la media o del modo, implica que la ecuación (25-81) es adecuada cuando todas las constantes k son iguales a la unidad. Por tanto, con la ecuación (25-81) la desviación estándar del (NPV) es la raíz cuadrada media de las desviaciones estándar individuales. En este caso s^* = $166 840 para el (NPV).

Si se supone que la distribución resultante es normal, entonces se puede generar de inmediato la curva de distribución acumulada. Según la tabla 25-9, un puntaje estándar de 4 corresponde a una probabilidad de 0.5 + 0.49997 = 0.99997 y uno de −4 a una probabilidad de 0.5 − 0.49997 = 0.00003, virtualmente la unidad y cero, respectivamente. Según la ecuación (25-73), un puntaje estándar de 4 corresponde a un (NPV) de $161 266 + (4) ($166 840) = $828 626 y uno de − 4 a un (NPV) de $506 094. Los valores de (NPV) correspondientes a otros límites de confianza se puede calcular en la misma forma y trazarlos para dar la curva de la figura 25-23.

Como se ha dicho, con las incertidumbres que hay en muchas evaluaciones del rango de diversos factores que se hacen en los negocios, el teorema del límite central implica que la suposición de una distribución normal de la variable principal tiene suficiente exactitud, siempre y cuando haya varios factores que influyan en la variable principal. Los resultados dan tanta información como la mayor parte de los cálculos con el método de Monte Carlo y tienen la ventaja de que se pueden lograr con rapidez sin recurrir a una computadora digital, sino sólo a una calculadora. En términos estrictos, las variables deben ser independientes y aditivas. Por ello es mejor, por ejemplo, tratar a (A_S − A_{TVE}) como una sola variable, pues tanto los ingresos por ventas como los gastos variables totales están relacionados con el volumen anual R de ventas. En esos casos, la desviación estándar de A_{TVE} se sumaría o se restaría de la de A_S antes de elevarla al cuadrado para obtener la varianza, según que la incertidumbre del grupo fuera mayor o menor que la de los factores individuales. Además, cuando está implicado un producto como $A_S = Rc_S$, se utilizaría la ecuación (25-84) en lugar de la (25-82) para calcular la varianza. Cuando se multiplican entre sí las incertidumbres predominantes, una distribución logarítmica normal daría una mejor distribución final. Se puede aplicar una técnica similar a la (DCFRR), siempre y cuando se utilice la ecuación (25-85) en vez de la (25-86) para calcular la varianza total de la variable principal.

Cuando los cálculos están bien fundados, se puede conservar el sesgamiento con el empleo de una distribución como la de Gompertz. La mediana de esa curva ocurre cuando $y = 0.5\,c$, mientras que el punto de inflexión corresponde al modo con $y = c/\exp(1) = 0.3679\,c$. El estadístico Karl Pearson sugirió, como medida sencilla del sesgamiento:

$$\text{Sesgamiento} = 3\,(\text{media} - \text{mediana})/\sigma \qquad (25\text{-}103)$$

y una aproximación empírica en términos del modo dada con:

$$(\text{Media} - \text{modo}) = 3\,(\text{media} - \text{mediana}) \qquad (25\text{-}104)$$

Al aplicar estas ecuaciones en este ejemplo,

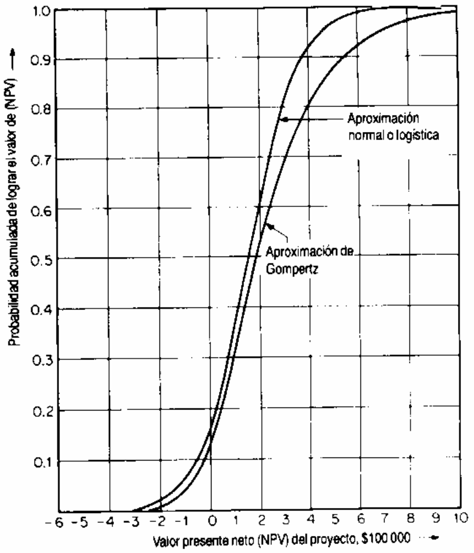


FIG. 25-23 Probabilidad acumulada de un valor presente neto determinado o menor para un proyecto, con aproximación normal y de Gompertz.

$$(\text{Media} - \text{modo}) = \$161\,266 - \$276\,224 = -\$114\,958$$
$$\text{Sesgamiento} = -\$114\,958/\$166\,840 = -0.6890$$

Con distribuciones simétricas, como la logística o la normal, el sesgamiento debe ser cero.

La distribución de Gompertz requiere que la distribución tenga sesgamiento positivo, lo cual se puede lograr si se considera a − (NPV) como la variable independiente y a (c − y) como la variable dependiente. Con la ecuación (25-104) la mediana aproximada de la distribución es

$$\text{Mediana} = [\$161\,266 - (-\$114\,958)]/3 = \$199\,585$$

Al sustituir valores en la ecuación (25-96) con − (NPV) como variable independiente a lograr, dado que el rango de y es de cero a unidad,

$$\ln(1 - 0.5) = \ln(1) - a\exp[(-b)(-\$199\,585)]$$
$$\ln(1 - 1/e) = \ln(1) - a\exp[(-b)(-\$276\,224)]$$
$$\text{por tanto } b = \frac{-\ln\{\ln(0.5)/\ln(1 - 1/e)\}}{[(-\$199\,585) - (-\$276\,224)]} = -5.388 \times 10^{-6}/\$$$
$$a = \frac{-\ln 0.5}{\exp[(5.388 \times 10^{-6}/\$)(-\$199\,585)]} = 2.0315$$

Entonces, la curva de distribución de Gompertz, es, en términos de (NPV):

$$\ln y = -2.0315\exp[-5.388 \times 10^{-6}(\text{NPV})]$$

Para el mismo grado de certidumbre que antes, es posible que el valor mínimo de (NPV) sea:

$$\ln\left[\frac{\ln(0.00003)}{-2.0315}\right] - 5.388 \times 10^{-6} = -\$303\,365$$

y que el máximo sea \$2 064 569 calculado en la misma forma para y = 0.99997. Los otros valores se calculan en la misma forma y se trazan como en la figura 25-23.

Árboles de decisión En un árbol de decisión típico, ilustrado en forma muy esquemática en la figura 25-24, cada nodo representa un punto de decisión (DP), en el cual están disponibles una o más opciones. Se selecciona algún resultado cuantificable de cada opción como base para comparación; por ejemplo, el valor presente neto (NPV). Se asigna un valor a la probabilidad de alcanzar cada resultado, ya sea acumulativo o no según se requiera. Éstos se pueden obtener con los métodos descritos o en otra forma. Las estimaciones están sujetas a la restricción de que la suma de las probabilidades de todas las ramas que salen de cada nodo será la unidad, porque alguna decisión se tomará allí.

Cuando se consideran dos inversiones, sea la opción B una inversión segura que tiene un valor presente neto básico $(\text{NPV})_B$ que es independiente de cualquier competencia. Se dejará que la opción A produzca un valor presente neto $(\text{NPV})_{A1}$ si no hay competencia, y $(\text{NPV})_{A2}$ si existe competencia. Después, sean las probabilidades de que no haya competencia y que la haya, p_1 y p_2, respectivamente. Entonces, p_2 debe ser igual a $(1 - p_1)$.

El (NPV) esperado para la opción A se puede escribir, según la ecuación (25-105), como:

$$(\text{NPV})_{WA} = p_1(\text{NPV})_{A1} + (1 - p_1)(\text{NPV})_{A2}$$

en donde $(\text{NPV})_{WA}$ es el valor presente neto ponderado para la opción A, basado en las probabilidades p_1 de no encontrar competencia y $(1 - p_1)$ de encontrarla.

En la misma forma, el (NPV) esperado para la opción B se da con

$$(\text{NPV})_{WB} = p_1(\text{NPV})_B + (1 - p_1)(\text{NPV})_B = (\text{NPV})_B$$

La ganancia en el valor esperado de la opción A en relación con la opción B es, por tanto,

$$\Delta(\text{NPV})_W = (\text{NPV})_{WA} - (\text{NPV})_{WB}$$

Supóngase que las opciones representadas en la figura 25-24 fueran tales que $(\text{NPV})_B = (0.5)(\text{NPV})_{A1} = 2(\text{NPV})_{A2}$. Entonces, la sustitución lleva a

$$\Delta(\text{NPV})_W = [2p_1 + 0.5(1 - p_1) - 1](\text{NPV})_B$$
$$= (1.5p_1 - 0.5)(\text{NPV})_B$$

La elección no tiene importancia cuando $\Delta(\text{NPV})_W = 0$, es decir, cuando $p_1 = 1/3$. Si la probabilidad de que no haya competencia es mayor de 1/3, se debe escoger la opción A, o la opción B en caso contrario.

La técnica está basada en los métodos de álgebra lineal y en la teoría de los juegos de azar. Cuando el problema tiene muchos puntos de decisión con ramas múltiples, se puede necesitar una computadora para seguir todas las trayectorias posibles y listarlas por orden de deseabilidad en términos del criterio cuantitativo escogido. Después, el tomador de decisión se puede concentrar en las trayectorias de la parte superior de la lista y escoger entre ellas con otros criterios, que quizá sean subjetivos. La técnica tiene muchas aplicaciones que se describen en las muchas publicaciones existentes y no se mencionará más.

Medidas numéricas del riesgo Si no existiera el riesgo, ni la recompensa del éxito al haberlo aceptado, no habría actividad comercial. Cuando se estiman las probabilidades de lograr diversos valores de valor presente neto (NPV) y de tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR), se presenta un intervalo en los posibles valores de (NPV) y de (DCFRR). Se han sugerido muchos métodos para evaluar los riesgos y las recompensas que se pueden esperar en los proyectos.

Considérese un proyecto propuesto en el cual hay una probabilidad p_1 de que habrá un $(\text{NPV})_1$, y una probabilidad p_2 de que habrá un $(\text{NPV})_2$, etc. Entonces, se puede calcular un $(\text{NPV})_w$ promedio ponderado, conocido como valor esperado con:

$$(\text{NPV})_w = p_1(\text{NPV})_1 + p_2(\text{NPV})_2 + \cdots \qquad (25\text{-}105)$$

en donde $p_1 + p_2 + \ldots = 1.0$.

Se pueden escribir ecuaciones análogas para otras medidas aditivas de la rentabilidad, como la utilidad neta.

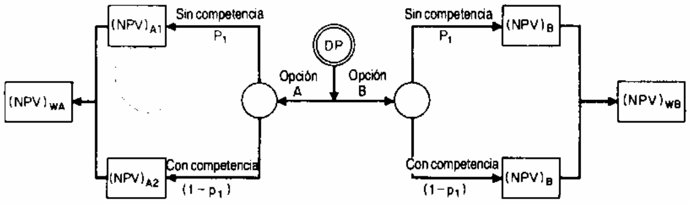


FIG. 25-24 Efecto de las opciones del árbol de decisión sobre el valor presente neto.

Ejemplo 12 Consid
de \$100 000 en un contr
000. Hay cuatro contratis
0.25 de lograr el contrato
0.75 de no lograrlo. Ento
0.25(

En este caso, la ganancia

Si la pérdida poten
las decisiones no se t
perado aunque la gan
decisiones no siempr
pérdida potencial rep
la empresa. Entre est
criterio muy útil, en e
de proyectos.

Una empresa pued
potencial de tasa de r
ser imposible reunir
empresa podría estar
extremos si la inversi
empresa hacia el ries

El dinero no tiene
dólar puede servir pa
insignificante para la
la actitud de una emp
por medio de una seri
ejecutivos:

"Su empresa ha c
tenciales de \$P desp
la utilidad neta de \$
una pérdida neta de
trato, ¿cuánto dinero
que lo eximieran del
rasen?"

Se pueden hacer l
probabilidades p_1 y

Ejemplo 12 Considérese un contratista que podría lograr una utilidad neta de \$100 000 en un contrato. El costo de preparación de la propuesta es de \$10 000. Hay cuatro contratistas competidores, cada uno con una probabilidad p_1 = 0.25 de lograr el contrato; por tanto, cada contratista tiene una probabilidad p_2 = 0.75 de no lograrlo. Entonces, el valor esperado del proyecto es

$$0.25(\$100\,000) + 0.75(-\$10\,000) = \$17\,500$$

En este caso, la ganancia potencial es 10 veces mayor que la pérdida potencial.

Si la pérdida potencial puede hacer quebrar a la empresa, entonces las decisiones no se toman, por necesidad, sobre la base del valor esperado aunque la ganancia potencial pueda ser elevada. Además, las decisiones no siempre se toman sobre la base del valor esperado si la pérdida potencial representa una cantidad más o menos pequeña para la empresa. Entre estos dos extremos, el valor esperado puede ser un criterio muy útil, en especial para una empresa que tiene gran número de proyectos.

Una empresa puede estar pensando en un proyecto con muy alto potencial de tasa de retorno o rendimiento y bajo riesgo, pero podría ser imposible reunir el dinero para iniciar el proyecto. A la inversa, la empresa podría estar dispuesta a emprender un proyecto con riesgos extremos si la inversión es de poca cuantía. Por ello, la actitud de una empresa hacia el riesgo depende de las circunstancias.

El dinero no tiene el mismo valor para cada empresa o persona. Un dólar puede servir para que coma un menesteroso y ser una cantidad insignificante para la persona que se lo dio. Se ha intentado cuantificar la actitud de una empresa hacia el dinero, el riesgo y la incertidumbre por medio de una serie de preguntas, como las siguientes, hechas a los ejecutivos:

"Su empresa ha concertado un contrato comercial con ingresos potenciales de \$*P* después de pagar impuesto. La probabilidad de lograr la utilidad neta de \$*P* es, por ejemplo, p_1 = 0.75 y la probabilidad de una pérdida neta de \$*P* es de p_2 = 0.25. Si prefiriera conservar el contrato, ¿cuánto dinero aceptaría por su interés en el mismo? Si prefiriera que lo eximieran del contrato, ¿cuánto dinero pagaría porque lo liberasen?"

Se pueden hacer las mismas preguntas para diferentes valores de las probabilidades p_1 y p_2. Las respuestas a estas preguntas pueden dar indicaciones de la importancia para la empresa de \$*P* con diversos grados de riesgo y se utilizan para trazar la curva de utilidad de la figura 25-25. Los valores positivos son las cantidades de dinero que aceptaría la empresa por renunciar a su participación. Los valores negativos son las cantidades de dinero que pagaría por evitar su participación. Sólo cuando el valor de utilidad y el valor esperado (línea recta, figura 25-25) son los mismos, se pueden justificar el valor presente neto (NPV) y la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) como criterios para inversión.

Debido a que la curva de utilidad tiene una base tan subjetiva, la mayor parte de las empresas prefieren la objetividad de (NPV) y de (DCFRR), en todo el alcance del presupuesto de ingresos y gastos normales. Los métodos subjetivos se suelen reservar para proyectos con riesgo excepcionalmente alto.

Una curva de utilidad (Fig. 25-25) es específica para cierta suma de dinero. Es posible que la curva sea diferente para, por ejemplo, *P* = \$10 000. La figura 25-25 sólo se puede utilizar para proyectos que quedan dentro del intervalo de −\$100 000 a +\$100 000. Para proyectos con otros valores se deben utilizar otras curvas de utilidad.

R. O. Swalm ["Utility Theory—Insight into Risk Taking", *Harv. Bus. Rev.*, **44**, 123-136 (noviembre-diciembre 1966)] encontró que muchos ejecutivos tienen dificultades para apreciar los matices tenues de las apuestas y sólo prefieren apostar a la segura. Preguntó a varios ejecutivos acerca de qué suma garantizada de dinero consideraban equivalente a un juego de azar relacionado con el lanzamiento de una moneda al aire o "volado". Si la moneda caía en un lado ganarían una suma determinada de dinero; si caía en el otro lado no recibirían nada.

Swalm empezó por considerar una suma de dinero equivalente al doble del desembolso máximo que podía autorizar el ejecutivo durante un año y la utilizó para obtener una utilidad adicional. En esta forma se pudo trazar una curva de utilidad. Swalm escogió una escala arbitraria de utilidad basada en un intervalo de −120 útiles a +120 útiles. (NOTA: Es igual de incorrecto comparar los útiles por su relación que implicar que un objeto que está a 30°C está el doble de caliente que uno que está a 15°C.)

Swalm encontró que la mayor parte de los ejecutivos son conservadores en sus desembolsos y que los patrones de las curvas de utilidad

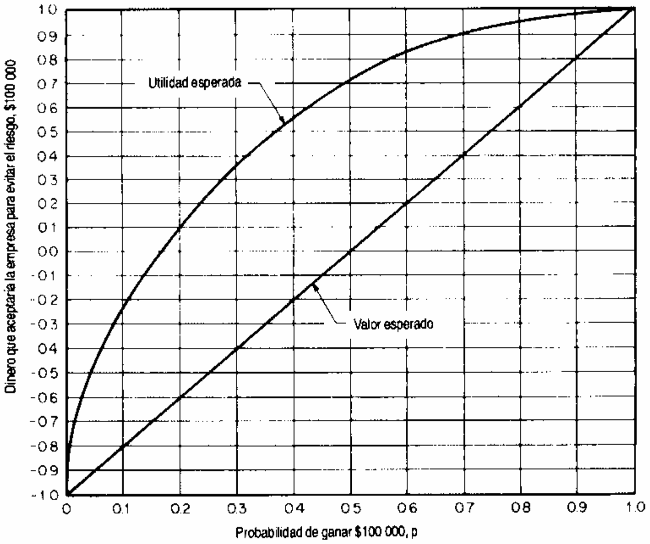


FIG. 25-25 Trazo de la función de utilidad para \$100 000, *p*.

son muy similares, si se trazan con un rango de ordenada de ± 1 unidad. La unidad, en este caso, es el desembolso anual máximo que puede autorizar el ejecutivo. Puede parecer que esas curvas difieren mucho cuando se trazan en términos de valores absolutos del dinero. Las curvas indican también que los ejecutivos tienden a ser más conservadores cuando consideran una pérdida, que cuando consideran una pequeña ganancia.

Ejemplo 13 Una empresa está pensando en invertir en uno o más de tres proyectos, A, B y C. Se desea evaluar las prioridades de inversión si las probabilidades de obtener diversos valores presentes netos (NPV) son las que aparecen en la tercera columna de la tabla 25-11. La ecuación (25-105) da el valor esperado para $(NPV)_w$. Entonces, para el proyecto A $(NPV)_w$ se calcula con los datos de la tabla 25-11 y se encuentra que es

$$(NPV)_w = 0.1(\$95\,000) + 0.8(\$45\,000) + 0.1(-\$75\,000)$$

$$(NPV)_w = \$9\,500 + \$36\,000 - \$7\,500$$

$$(NPV)_w = \$38\,000$$

Los valores correspondientes para los proyectos B y C se calculan en la misma forma; se presentan en la tabla 25-11.

En el proyecto A, la probabilidad $p = 0.1$ para (NPV) = \$95 000. En la figura 25-25 se muestra que \$95 000 es la cantidad de dinero que pagaría la empresa por una probabilidad de 0.8 de ganar \$100 000. Hay por tanto, una probabilidad de 0.2 de perder \$100 000. En este caso, una probabilidad de $p = 0.1$ de ganar \$95 000 es equivalente a una utilidad probable de (0.1) (0.8) = 0.08 de ganar \$100 000.

La ecuación (25-105) se puede utilizar para calcular la utilidad esperada si se sustituyen las probabilidades p_1, p_2, etc., por las utilidades probables y si los valores presentes netos $(NPV)_1$, $(NPV)_2$ etc., se reemplazan por \$100 000 cada uno. Para el proyecto A, la utilidad esperada, U_w, es:

$$U_w = [0.1(0.8) + 0.8(0.34) + 0.1(0.03)]\$100\,000$$

$$U_w = \$8\,000 + \$27\,200 + \$300$$

$$U_w = \$35\,500$$

Los valores correspondientres para los proyectos B y C se calculan en la misma forma y aparecen en la tabla 25-11.

La línea recta de la figura 25-25 representa la situación en la cual el valor esperado y la utilidad esperada son iguales en el intervalo de − \$100 000 a + \$100 000. En este caso, las decisiones se pueden tomar sobre la base rutinaria del máximo valor esperado. En otros casos, las decisiones se deben tomar sobre la base de la máxima utilidad esperada. La curva de utilidad en la figura 25-25 representa la actitud actual de la administración respecto a \$100 000. Esta curva se debe actualizar conforme cambie la situación financiera de la empresa. En este ejemplo, la curva de utilidad está encima de la línea recta. Esto representa la tendencia de quienes toman las decisiones de la empresa a correr un riesgo. Cuando la curva de utilidad está debajo de la línea recta implica un espíritu conservador. Las prioridades de inversión deben ser poner en marcha el proyecto A y, luego, si hay recursos financieros, el proyecto B.

Podría parecer que también se consideraría el proyecto C, en vista de la utilidad esperada de \$16 700. Sin embargo, es preferible no hacer nada que poner en marcha el proyecto C. La utilidad de no hacer nada, que es equivalente a pagar \$0, es de 0.17 como se ve en la figura 25-25. Esto da una utilidad probable correspondiente de (1.0)(0.17)(\$100 000), o sean \$17 000. Éste es un resultado mejor que si se invirtiera en el proyecto C.

En este ejemplo, el orden de prioridades basado en las utilidades esperadas es el mismo que el basado en los valores esperados. Sin embargo, ese orden está bien definido sobre la base del valor esperado, pero mucho menos sobre la base de la utilidad esperada.

El capital está en riesgo hasta que se llega al punto de equilibrio. Se acostumbra tener en consideración el punto de equilibrio descontado (DBEP), o sea, el momento en el cual el (NPV) es cero cuando se descuenta al costo del capital. En cualquier tiempo después del (DBEP), el proyecto habrá recuperado su costo y aportado mayor rendimiento sobre el capital que el costo del capital. Se acostumbra que la administración distribuya el riesgo mediante la diversificación de las actividades de la empresa entre una cartera de proyectos.

R. L. Reul [*Chem. Eng. (London)*, **238**, CE 120-125 (mayo 1970)] expuso un parámetro que llamó función de supervivencia medida (MSF) expresada por:

$$(MSF) = 1 - (1 - p)^{\beta} \qquad (25\text{-}106)$$

en donde (MSF) es la probabilidad de que una cartera de riesgos o apuestas con una estrategia similar alcance, cuando menos, el punto de equilibrio y β es el importe de una ganancia dividida entre la cantidad de cada apuesta. Reul ha aplicado la ecuación (25-106) a las actividades de investigación y desarrollo de una empresa. Esa ecuación está basada en la suposición simplificada de que un proyecto tiene éxito con la probabilidad p y da la recompensa esperada, o bien fracasa con la probabilidad $(1 - p)$. Por tanto, (MSF) es la probabilidad de, cuando menos, un éxito cuando se ponen en marcha β proyectos similares y representa una medida conservadora del riesgo. Se entiende que $\beta > 1$ y por tanto que $(MSF) > p$. Muchos proyectos pueden dar mayores rendimientos o una probabilidad más grande de lograr un rendimiento determinado si se gasta más dinero. Cada resultado derivable alterno de un proyecto dado se considera como un riesgo separado en la cartera.

Las actividades de investigación y desarrollo, por sí mismas, no dan por resultado un producto vendible. Por tanto, no pueden generar en forma directa un rendimiento a partir de un desembolso de capital. Un proyecto de investigación y desarrollo con éxito es el que da lugar a una actividad que produce ingresos para la empresa. El ciclo de vida de un ingreso por un producto individual puede ser el mostrado en la figura 25-26.

El ingreso tiene que servir para pagar no sólo el proyecto que ha tenido éxito sino también las actividades infructuosas de investigación y desarrollo. Se acostumbra considerar a la totalidad de I y D como una cartera; los desembolsos para I y D son más o menos flexibles y se

TABLA 25-11 Comparación de proyectos en términos de valores esperados y utilidad esperada

Proyecto	(NPV), \$	Probabilidad, p	Probabilidad equivalente de ganar \$100 000	Utilidad probable	Valor esperado, \$	Utilidad esperada, \$
	95 000	0.1	0.80	0.080	9 500	8 000
A	45 000	0.8	0.34	0.272	36 000	27 200
	−75 000	0.1	0.03	0.003	−7 500	300
		1.0		0.355	38 000	35 500
	50 000	0.2	0.37	0.074	10 000	7 400
B	20 000	0.6	0.23	0.138	12 000	13 800
	−60 000	0.2	0.04	0.008	−12 000	800
		1.0		0.220	10 000	22 000
	45 000	0.1	0.35	0.035	4 500	3 500
C	10 000	0.6	0.20	0.120	6 000	12 000
	−60 000	0.3	0.04	0.012	−18 000	1 200
		1.0		0.167	−7 500	16 700

00. Éste es un resultado
s utilidades esperadas es
embargo, ese orden está
cho menos sobre la base
unto de equilibrio. Se
equilibrio descontado
es cero cuando se des-
después del (DBEP),
lo mayor rendimiento
umbra que la adminis-
cación de las activida-
s.
20-125 (mayo 1970)]
upervivencia medida

(25-106)

a cartera de riesgos o
ando menos, el punto
cia dividida entre la
ecuación (25-106) a
de una empresa. Esa
ficada de que un pro-
ecompensa esperada,
or tanto, (MSF) es la
ado se ponen en mar-
dida conservadora del
SF) > p. Muchos pro-
na probabilidad más
i se gasta más dinero.
to dado se considera

por sí mismas, no dan
no pueden generar en
mbolso de capital. Un
o es el que da lugar a
resa. El ciclo de vida
ser el mostrado en la

lo el proyecto que ha
osas de investigación
ilidad de I y D como
o menos flexibles y se

pueden cambiar de un proyecto poco viable a uno más favorable en un momento dado.

Cuando se consideran los proyectos individuales, β se debe manejar como lo que sea menor de:

$$\beta = \frac{\text{ingresos esperados si el proyecto tiene éxito}}{\text{desembolsos para el proyecto}}$$

$$\text{o } \beta = \frac{\text{desembolso total para todos los proyectos en el periodo presupuestado}}{\text{desembolso en el proyecto en el periodo presupuestado}}$$

Debido a que los proyectos en una cartera tendrán por lo general, diferentes probabilidades de éxito y de recompensa, β y p en la ecuación (25-106) se calculan conservadoramente como sigue:

$$\beta = \frac{\text{ingresos totales anuales si todos los proyectos tienen éxito}}{\text{desembolso total anual en todos los proyectos}}$$

$$p = \frac{\text{valor total esperado de todos los proyectos}}{\text{ingresos totales si todos los proyectos tienen éxito}}$$

El valor esperado se puede calcular con la ecuación (25-105).

La relación entre (MSF), p y $1/\beta$ en la ecuación (25-106) se muestra en forma gráfica en la figura 25-27. La administración es la responsable de decidir un valor aceptable de (MSF) para la empresa. El valor

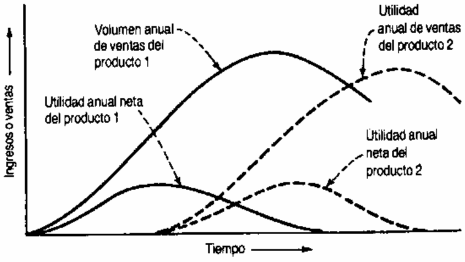


FIG. 25-26 Ciclo de vida de los productos.

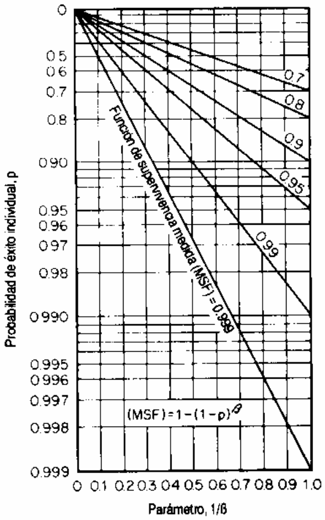


FIG. 25-27 Trazo de función de supervivencia medida.

seleccionado dependerá de la actitud de la empresa hacia el riesgo que se puede cuantificar en forma de una curva de utilidad, como la de la figura 25-25, con la que se puede obtener un valor de (MSF) equivalente.

La administración es también la responsable de calcular las probabilidades de éxito de cada proyecto, después de estudiar los datos suministrados por diversos departamentos. La tasa de retorno o rendimiento sobre la inversión que es aceptable para la administración es en función de dichas responsabilidades. Cada industria tiene un rendimiento sobre la inversión definido en forma razonable, que refleja el grado de riesgo inherente en esa industria. Si la administración toma decisiones erróneas, entonces incurrirán en gastos excesivos o perderán oportunidades.

Con un desembolso de \$1000 en el año 0, se llegará al punto de equilibrio descontado (DBEP) en 3 años con una tasa de interés compuesto de 30%, si la ganancia neta anual A_{NP} = \$550.63 anuales. Por tanto, una tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) de 30% corresponde a:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\$1000}{(3\ \text{años})(\$550.63/\text{anuales})} = 0.61$$

Para $1/\beta = 0.61$ y una (MSF) = 0.999, en la figura 25-27 se ve que la probabilidad de éxito $p = 0.985$. En forma similar, se puede deducir que si (MSF) = 0.999 y $p = 0.95$, se requiere una (DCFRR) de 45%, si es aceptable llegar al punto de equilibrio en 20 años, entonces se necesita una (DCFRR) de sólo 10%.

Ejemplo 14 En la tabla 25-12 aparecen las estimaciones del programa actual de investigación y desarrollo de una empresa. Se calculará la probabilidad de que esta cartera de proyectos pueda, cuando menos, llegar al punto de equilibrio.

El desembolso total anual propuesto para I y D es de \$500 000. El ingreso anual real total si todos los proyectos llegan a producir el ingreso previsto sería de \$1 300 000. Por tanto,

$$\beta = \$1\,300\,000/\$500\,000 = 2.600$$

El proyecto A tiene un valor esperado de (0.95)(\$500 000 anuales) = \$475 000 anuales; el proyecto B tiene un valor esperado de (0.90)(\$400 000 anuales) = \$360 000 anuales, etc. Se suman estos valores para obtener el valor esperado total de la cartera, que debe ser de \$1 109 500 por año. Entonces:

$$p = (\$1\,109\,500\ \text{anuales})/(\$1\,300\,000\ \text{anuales}) = 0.8535$$

TABLA 25-12 Ejemplo de una cartera de proyectos para un programa de investigación y desarrollo

Proyecto	Desembolso propuesto para el año siguiente	Utilidad anual después de impuestos si tiene éxito	Probabilidad de éxito
A	\$125 000	\$ 600 000	0.95
B	100 000	400 000	0.90
C	100 000	125 000	0.80
D	80 000	100 000	0.75
E	50 000	60 000	0.70
F	20 000	30 000	0.65
G	20 000	70 000	0.50
H	5 000	15 000	0.20
Totales	\$500 000	\$1 400 000	

En la figura 25-27, para una probabilidad de éxito $p = 0.8535$ y un valor $1/\beta = 1/2.600 = 0.3846$, la (MSF) es de 99.3%. Ésta es la probabilidad de que esta cartera, cuando menos, llegará al punto de equilibrio.

Como opción, se pueden sustituir los valores de p y β en la ecuación (25-106) para obtener

$$(\text{MSF}) = 1 - (1 - 0.8535)^{2.6} = 0.9932 = 99.32\%$$

Se pueden relacionar las curvas de (MSF) y de utilidad.

Ejemplo 15 Se desea trazar una curva de función de utilidad equivalente al siguiente patrón de funciones de supervivencia medida (MSF), que exprese la

estrategia de un determinado gerente cuando tenía que desembolsar un presupuesto anual autorizado de \$1 000 000:

Caso	Ingresos potenciales anuales, \$	(MSF), %
a	Mayores de 600 000	99.9
b	300 000 a 600 000	95.0
c	0 a 300 000	65.0
d	Pérdidas	75.0

Se trazará la curva resultante en una escala de utilidad de ±120 útiles contra una ganancia potencial de ± \$1 000 000.

Los ejes requeridos van desde −\$1 000 000 anuales a +\$1 000 000 anuales y de −120 útiles a +120 útiles. Los útiles se pueden comparar por relación sólo en una escala absoluta. Entonces, para fines de cálculo se mueven los ejes para proporcionar un rango de trabajo de \$0 anuales a \$2 000 000 anuales y de 0 a 240 útiles (Fig. 25-28). En estos ejes, una ganancia potencial de \$600 000 anuales corresponde a una cantidad absoluta de (600 000 + 1 000 000) = \$1 600 000 anuales. y una pérdida potencial de \$200 000 anuales a una cantidad absoluta de (−200 000 + 1 000 000) = \$800 000 anuales.

a. Para ingresos anuales superiores a \$600 000, (MSF) es de 99.9%. Si hay que abandonar la certidumbre de una ganancia anual de \$600 000 en un esfuerzo por obtener una ganancia anual de \$1 000 000, entonces, sobre la base de un valor absoluto:

$$\beta = (\$2\,000\,000 \text{ anuales})/(\$1\,600\,000) = 1.2500$$

Con $1/\beta = 0.8000$ y (MSF) = 99.9%, se encuentra la probabilidad de éxito requerida al resolver la ecuación (25-106) para p:

$$p = 1 - (1 - 0.999)^{0.800} = 0.996$$

La utilidad de una cantidad de dinero es la que se tiene la certidumbre de lograr multiplicada por su probabilidad de lograrla. En una escala en la cual un ingreso anual absoluto de \$2 000 000 tiene una utilidad de 240 útiles, la utilidad de \$1 600 000 es de (0.996)(240) o sean 239 útiles.

b. Para ingresos anuales entre \$300 000 y \$600 000, (MSF) = 95%. Si hay que abandonar la certidumbre de una ganancia anual de \$300 000 para obtener una ganancia anual de \$600 000, entonces, igual que antes:

$$1/\beta = \$1\,300\,000 \text{ anuales}/\$1\,600\,000 \text{ anuales} = 0.8125$$

$$p = 1 - (1 - 0.95)^{0.8125} = 0.912$$

Dado que en esta empresa la utilidad de un ingreso absoluto de \$1 600 000 es de 239 útiles, el valor de \$1 300 000 es (0.912)(239) = 218 útiles. En las escalas originales, los ingresos potenciales anuales de \$300 000 tienen una utilidad de (218 − 120), o sea, 98 útiles.

c y *d*. Los valores de utilidad con otros ingresos potenciales anuales se calculan en la misma forma y aparecen en la figura 25-28.

Esta estrategia es muy conservadora cuando hay la posibilidad de ganancias elevadas, pero es menos conservadora para ganancias potenciales menores. Si se incluyen pérdidas potenciales, esta estrategia es razonable, y en ella (NPV) sería una guía exacta para seleccionar las opciones.

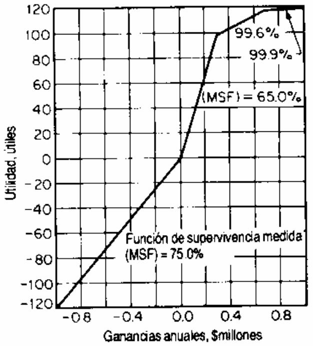


FIG. 25-28 Trazo de función de utilidad que ilustra la estrategia de la administración.

Aseguramiento y riesgo En el método de evaluación mediante la prima del riesgo, se necesitan inversiones arriesgadas para lograr una tasa de rendimiento que agregue un premio o prima al costo de la financiación. D. F. Rudd y C. C. Watson (*The Strategy of Process Engineering*, Wiley, New York, 1968, p. 91) presentan la relación

$$i_m = i + i_r \qquad (25\text{-}107)$$

en donde i es el costo del capital, i_m es la tasa mínima aceptable de retorno o rendimiento sobre la inversión e i_r es la tasa de riesgo.

Sugieren que cada proyecto debe pagar una prima de seguro i_r para garantizar las utilidades esperadas. La magnitud de i_r es proporcional a la cantidad de capital que se va a arriesgar y también es función del grado de riesgo involucrado. Se considera que el capital de trabajo y el capital para servicios auxiliares están libres de riesgo. Por ello, la tasa de riesgo sólo se aplica a la fracción de la inversión de capital que se perdería si hubiera que terminar el proyecto en forma inesperada.

La objeción principal al método de la prima del riesgo es que puede ser subjetiva la evaluación de lo arriesgado de un proyecto. Esto podría ocasionar el rechazo de propuestas con atractivo potencial y la aceptación de proyectos sólo porque parecen estar libres de riesgo.

Una póliza de seguro es una protección contra un riesgo. Las compañías de seguros minimizan sus propios riesgos porque cubren a gran número de asegurados contra el mismo riesgo y porque ofrecen cobertura para gran variedad de riesgos diferentes. A menudo, es difícil evaluar la probabilidad de éxito de determinado proyecto de investigación y desarrollo. Es mucho más fácil que una compañía de seguros evalúe las probabilidades mediante cálculo actuarial y las tablas de siniestralidad.

Algunas empresas tienen autoseguro, cuando las reclamaciones que les presenten es posible que sean una pequeña fracción del capital disponible. El costo de una póliza comercial puede ser hasta 30% mayor que el del autoseguro en la empresa. Sin embargo, para los riesgos de baja probabilidad y alto costo, casi todas las empresas prefieren contratar una póliza de seguro; esos riesgos pueden incluir daños a edificios y sus contenidos por incendio y pérdidas de ingresos por demoras en el arranque o por huelgas.

También se ha vuelto necesario contratar un seguro para factores que hasta hace poco no se tenían en cuenta; por ejemplo, contra posibles demandas por contaminación atmosférica. El costo de los seguros aumentó los gastos totales anuales A_{TE} y por ello un exceso de sumas aseguradas producirá una reducción innecesaria en la rentabilidad. La administración de la empresa es la que debe determinar los riesgos y las sumas aseguradas.

Calcúlese, por ejemplo, la tasa de riesgo requerida para un proyecto en el cual: **1)** la estrategia del riesgo es equivalente a una (MSF) de 99%, **2)** el periodo de recuperación del capital de riesgo es de 3 años; **3)** el costo del capital i es de 10%, y **4)** la probabilidad calculada de éxito completo del proyecto es de 95%.

Primero, se calcula el valor de ß en la ecuación (25-106). Para este proyecto, con (MSF) = 0.99 y $p = 0.95$,

$$\beta = \frac{\log[1 - (\text{MSF})]}{\log(1 - p)} = \frac{\log(0.01)}{\log(0.05)} = 1.537$$

Para recuperar esta suma de capital e intereses en 3 años, el flujo anual neto de efectivo A_{CF} requerido es:

$$A_{CF} = 1.537/3 = 0.5124(\$ \text{ anuales})/(\$ \text{ invertidos})$$

En la práctica, al comparar el flujo anual neto de efectivo por dólar invertido, se ha obtenido el valor de f_{AP} según la ecuación (25-46) para este ejemplo. En las tablas de factor de valor presente de una anualidad, f_{AP}, se encuentra que el valor de la tasa de intereses es de $i_m = 0.25$, cuando $f_{AP} = 0.5124$ y $n = 3$ años.

Entonces, al sustituir los valores correspondientes en la ecuación (25-107) y resolver para la tasa de riesgo requerida,

ıaluación mediante la
gadas para lograr una
rima al costo de la fi-
tegy of Process Engi-
ın la relación

(25-107)

mínima aceptable de
a tasa de riesgo.
rima de seguro i_r para
l de i, es proporcional
ımbién es función del
capital de trabajo y el
iesgo. Por ello, la tasa
sión de capital que se
forma inesperada.
el riesgo es que puede
proyecto. Esto podría
potencial y la acepta-
es de riesgo.
a un riesgo. Las com-
gos porque cubren a
sgo y porque ofrecen
entes. A menudo, es
rminado proyecto de
il que una compañía
e cálculo actuarial y

las reclamaciones que
acción del capital dis-
ser hasta 30% mayor
go, para los riesgos de
presas prefieren con-
incluir daños a edifi-
ingresos por demoras

seguro para factores
ejemplo, contra posi-
El costo de los seguros
o un exceso de sumas
en la rentabilidad. La
terminar los riesgos y

rida para un proyecto
lente a una (MSF) de
le riesgo es de 3 años;
abilidad calculada de

ón (25-106). Para este

) = 1.537

n 3 años, el flujo anual

invertidos)

de efectivo por dólar
ecuación (25-46) para
ente de una anualidad,
reses es de i_m = 0.25,

lientes en la ecuación
ida,

$$i_r = i_m - i$$
$$= 25 - 10 = 15\%$$

con base en el periodo de recuperación del capital de riesgo. Todo el capital C_{WC} se recupera por completo sin riesgo y requiere sólo 10% de intereses. La parte no recuperada del capital de riesgo C_{FC} atrae la tasa adicional de interés sobre el capital de riesgo de 15%, que se debe deducir conforme se recupera el capital de riesgo.

En la siguiente ecuación se presenta un punto de vista diferente del riesgo:

$$[1 + (\text{DCFRR})] = (1 + i)(1 + i_r') \qquad (25\text{-}108)$$

La (DCFRR) representa el retorno o rendimiento de todo el capital invertido después de haberlo recuperado, junto con cualesquiera intereses pagados por haberlo tomado en préstamo y después del pago de gastos e impuestos relacionados con el proyecto. Por tanto, representa el rendimiento para la empresa por el manejo del capital total empleado. Si el costo del capital i se establece para el mejor uso, libre de riesgo, de ese capital, como los intereses sobre depósitos a plazo fijo o la compra de bonos gubernamentales, etc., i_r' representa el rendimiento adicional para la empresa sobre ese capital por haber aceptado los riesgos. Este concepto es útil porque la probabilidad de lograr una (DCFRR) dada y, por tanto, de un valor particular de i_r', se puede calcular con los métodos descritos. Se verá que cuando i se define en esa forma, implica que se han pagado todos los impuestos e intereses. Por tanto, $100 invertidos en un banco a una tasa del 10%, con la mitad del dinero tomada a préstamo al 15% y con impuestos a empresas del 40%, darían como resultado un ingreso libre de riesgos, después de pagar impuesto, de

$$[(\$100)(0.10 \text{ anual}) - (0.5)(\$100)(0.15 \text{ anual})](1 - 0.40) = \$1.5 \text{ anuales}$$

Ese mismo dinero invertido en un proyecto con (DCFRR) de 10% produciría, de acuerdo con la ecuación (25-108), un rendimiento a la empresa de $i_r' = 8.37\%$ sobre la inversión total, es decir, $8.37/$100. La inversión del dinero propio de la empresa sólo daría un rendimiento, después de impuestos, de (0.1)(1 − 0.40) = 6% sobre $50, o sea, $3/$100 de la inversión total. Por tanto, el incentivo para que la empresa maneje ese proyecto corresponde a un ingreso libre de impuestos de $5.37/$100 de la inversión total. En la práctica, se toma dinero a préstamo en más de una fuente con diferentes tasas de interés y con distintas tasas de impuestos. El costo real del capital en esos casos se puede obtener con una ampliación de los datos anteriores y lo describen en detalle A. J. Merrett y A. Sykes (*Capital Budgeting and Company Finance*, Longmans, London, 1966, pp. 30-48).

Inflación En la actualidad es necesario evaluar la rentabilidad de las inversiones propuestas cuyas futuras ganancias sufrirán el efecto de la inflación. Hace años no se tenían en cuenta los efectos de la inflación, porque se pensaba que ya era bastante difícil predecir la tasa de intereses en el mercado y, por tanto, la tasa correspondiente de descuento para el futuro flujo de efectivo, para todavía tener que preocuparse por la inflación. Pero si no se intenta, cuando menos, tratar de predecir la tasa de inflación y tenerla en cuenta, se pueden alterar en forma notable los aspectos económicos de un proyecto, en especial con las tasas de dos cifras que ocurren en casi todo el mundo. Es bien sabido que una cantidad dada de dinero compra menos bienes y servicios conforme avanza el tiempo. El problema es expresarlo en forma cuantitativa.

Las cifras publicadas sobre las tasas de inflación están basadas en alguna mezcla particular de bienes y servicios que se selecciona para representar las necesidades materiales de la persona promedio. Si una cantidad determinada de esa mezcla específica costaba $100 el año pasado y ahora cuesta $120, entonces ha sufrido una tasa de inflación del 20%. En consecuencia, el poder adquisitivo de la moneda, o sea, de los $120 para esos bienes y servicios, ha caído por un factor de ($120 − 100)/$120 = 16.7%.

Hay dos clases de inflación: general (abierta) y diferencial (moderada). Con la primera, todos los costos y precios aumentan a una tasa uniforme. Por tanto, se calculará la misma tasa de inflación sin que importe la mezcla particular seleccionada de bienes y servicios. En el segundo caso, la tasa de inflación dependerá de los patrones de gasto de las personas o las empresas. Por ejemplo, los costos de mano de obra y de material de una empresa pueden sufrir diferente tasa de inflación. En gran parte, la inflación se vuelve diferencial en campos como impuestos, control de importaciones y control de precios.

El efecto de la inflación sobre el valor real de las futuras ganancias de un proyecto no se debe confundir con el efecto de las tasas de intereses de mercado sobre aquellas ganancias. En términos estrictos, la tasa de intereses en el mercado y la de inflación no son totalmente independientes, o al menos eso dicen algunos economistas. Sin embargo, en esta obra se considera como si fueran separadas. Debido a cada efecto, un dólar de ingresos por el proyecto el año próximo tendrá menor valor que un dólar en caja hoy. El efecto de la tasa de interés se podría contrarrestar porque se podría efectuar una inversión financiera a la tasa vigente de interés y recuperar ese dólar y los intereses en un plazo de un año. Por contraste, el efecto de la inflación ocurre simplemente porque un dólar puede comprar más ahora que hace un año por

TABLA 25-13 Cálculos de (NPV) cuando no hay inflación

Año, n	Desembolso neto de capital, A_{TC}	Ingresos por ventas, A_S	Gastos totales, A_{TE}	Ingreso en efectivo, A_{CI} $(= A_S - A_{TE})$	Cargo por depreciación, A_D	Ingreso gravable, $(A_{CI} - A_D)$	Importe de impuesto con $t = 0.5 A_{IT}$ $[= (A_{CI} - A_D)t]$	Flujo neto de efectivo después de impuestos, A_{CF} $(= A_{CI} - A_{IT} - A_{TC})$	Factor de descuento con i = 10%, f_d $\left[= \frac{1}{(1+0.1)^n}\right]$	Flujo de efectivo neto descontado, A_{DCF} $[= A_{CF}(f_d)]$	Valor presente neto (NPV), $\left(= \sum_0^n A_{DCF}\right)$
0	$1 100 000	0	0	0	0	0	0	−$1 100 000	1.00000	$1 100 000	−$1 100 000
1	0	$500 000	$100 000	$400 000	$200 000	$200 000	$100 000	300 000	0.90909	272 727	− 827 273
2	0	500 000	100 000	400 000	200 000	200 000	100 000	300 000	0.82645	247 935	579 338
3	0	500 000	100 000	400 000	200 000	200 000	100 000	300 000	0.75131	225 393	353 945
4	0	500 000	100 000	400 000	200 000	200 000	100 000	300 000	0.68301	204 903	149 042
5	−100 000	500 000	100 000	400 000	200 000	200 000	100 000	400 000	0.62092	248 368	+99 326

TABLA 25-14 Cálculos de (NPV) cuando hay inflación no tomada en cuenta

Año, n	Desembolso neto de capital, A_{TC}	Ingresos por ventas, A_S	Gastos totales, A_{TE}	Ingresos en efectivo, A_{CI}	Cargo por depreciación, A_D	Ingreso gravable $(A_{CI} - A_D)$	Importe de impuestos con $t = 0.5, A_{IT}$	Flujo neto de efectivo, A_{CF}	Factor de descuento con i = 10%, f_d	Flujo de efectivo neto descontado, A_{DCF}	Valor presente neto (NPV)
0	$1 100 000	0	0	0	0	0	0	$1 100 000	1.00000	−$1 100 000	−$1 100 000
1	0	$500 000	$100 000	$400 000	$200 000	$200 000	$100 000	300 000	0.90909	272 727	−827 273
2	0	600 000	120 000	480 000	200 000	280 000	140 000	340 000	0.82645	280 993	546 280
3	0	720 000	144 000	576 000	200 000	376 000	188 000	388 000	0.75131	291 508	254 772
4	0	864,000	172 800	691 200	200 000	491 200	245 600	445 600	0.68301	304 349	+ 49 577
5	−100 000	1 036 800	207 360	829 440	200 000	629 440	314 720	614 720	0.62092	381 692	+ 431 269

un aumento irreversible en los precios. Esta distinción se aclara a continuación.

Efecto de la inflación sobre el (NPV) Cuando se calcula el (NPV) para un proyecto propuesto, ocurrirán errores si sólo se suman entre sí los flujos reales de efectivo en lugar de ajustar todos los valores a su poder adquisitivo en un año determinado. La razón se encuentra en la base para el cálculo de (NPV). Hay que reescribir la ecuación (25-57) para dar

$$(\text{NPV}) = A_{CF0} + \sum_{1}^{n} \frac{A_{CFn}}{(1+i)^n} \qquad (25\text{-}109)$$

La ecuación (25-109) es válida para el caso en que no haya inflación. Cuando hay inflación general con una tasa fraccional i_i, esta ecuación se puede escribir en su forma modificada:

$$(\text{NPV}) = A_{CF0} + \sum_{1}^{n} \frac{A_{CF0}}{(1+i)^n(1+i_i)^n} \qquad (25\text{-}110)$$

La ecuación (25-110) permite corregir todos los flujos anuales netos de efectivo a su poder adquisitivo en el año 0. Si la tasa de inflación es de cero, la ecuación (25-110) se vuelve idéntica a la (25-109).

En el siguiente ejemplo se ilustra el efecto de la inflación sobre el (NPV) y sobre los impuestos que debe pagar la empresa.

Ejemplo 16 Considérese un proyecto simplificado en el cual, en el año 0, se invierte un capital de $1 100 000, del que $1 000 000 son para partidas de capital fijo y $100 000 para capital de trabajo. El capital fijo se deprecia en línea recta hasta llegar a un valor en libros de cero al final del año 5. El ingreso anual por ventas en los años 1 a 5 es de $500 000; no hay inflación. Los $100 000 de capital de trabajo se recuperan al final del año 5. La tasa de impuestos es de 50% y la tasa de intereses en el mercado es de 10%. En la tabla 25-13 aparecen los datos de flujo de efectivo de este proyecto y se indica que el (NPV) al final del año 5 es de $99 326, calculado con la ecuación (25-109).

Ahora se modificará este ejemplo con la suposición de que hay una tasa general de inflación de 20% anual y que el analista del proyecto no tiene en cuenta la inflación y aplica, aunque en forma incorrecta, la ecuación (25-109). En la tabla 25-14 aparecen los datos de ingresos y gastos para este caso y producen un (NPV) de $431 269. Cuando se utiliza la ecuación (25-109), en forma incorrecta, en el mismo ejemplo con otras diferentes tasas de inflación, se puede trazar el (NPV) resultante como la línea superior en la figura 25-29.

Si se tiene en cuenta la inflación mediante el empleo de la ecuación (25-110), los resultados tendrán una notable diferencia. Si se hace un descuento adicional de los flujos de efectivo descontados, A_{DCF} de la tabla 25-14, con los factores f_d correspondientes a una tasa de inflación del 20% antes de hacer la suma, se puede ver que el proyecto realmente tendrá un (NPV) negativo de $208 733 en términos de dinero no inflado. La línea inferior en la figura 25-29 amplía este ejemplo porque supone el empleo de otras tasas de inflación. En la figura 25-29 se ilustra que el efecto de la inflación, si no se tiene en cuenta, hará que el proyecto parezca más rentable de lo que es en la realidad.

En la tabla 25-14 se indica que la cantidad total de impuestos pagados realmente en el periodo de cinco años fue de $988 320, que se convierten en $534 272 en dinero no inflado cuando se corrige el importe del impuesto en cada año a su poder adquisitivo en el año 0, mediante el empleo de los factores f_d para la tasa de inflación de 20% utilizada en este ejemplo. También se pueden hacer los cálculos para otras tasas de inflación y trazar los resultados como se ven en la figura 25-30.

Esto confirma que aunque los impuestos pagados aumentarán con la inflación, la ganancia para el gobierno será más aparente que real. Es interesante mencionar que aunque los impuestos pagados corregidos a su poder adquisitivo en el año 0 son casi constantes, sin que importe la tasa de inflación, llegan a un máximo con una tasa de inflación de alrededor de 17% en este ejemplo.

Efecto de la inflación sobre la (DCFRR) Un flujo anual neto de efectivo, A_{CF}, tendrá un valor monetario de $A_{CF}(1+i)$ un año más tarde, si se invierte a una tasa fraccionaria i de interés. Si hay inflación a una tasa anual de i_i, entonces se pueden definir una tasa real de rendimiento o de interés i_e con la ecuación

$$A_{CF}(1+i_e) = [A_{CF}(1+i)]/(1+i_i) \qquad (25\text{-}111)$$

que se puede simplificar y reescribir para dar

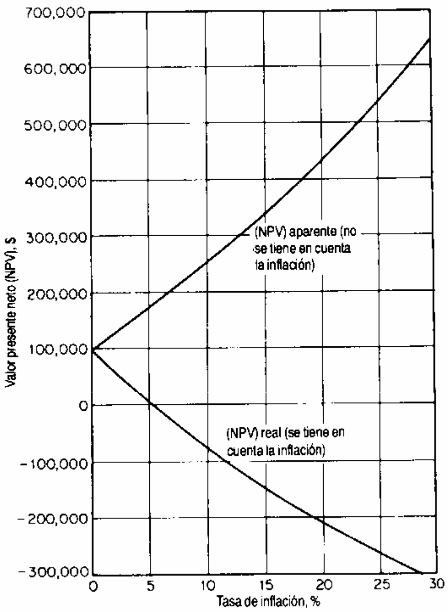


FIG. 25-29 Efecto de la tasa de inflación sobre el valor presente neto de un proyecto.

$$i_e = i - i_i - i_e i_i \qquad (25\text{-}112)$$

En el contexto de (DCFRR), la ecuación (25-112) se convierte en:

$$i_e = (\text{DCFRR}) - i_i - i_e i_i \qquad (25\text{-}113)$$

En esta ecuación, (DCFRR) se puede considerar que es la nominal y no está corregida según la inflación y se puede considerar que i_e es la (DCFRR) real.

En lugar de utilizar la ecuación (25-113), hay la mala costumbre, bastante común, de tratar de obtener la tasa real de retorno o rendimiento mediante el cálculo de la (DCFRR) nominal, con base en los flujos anuales netos de efectivo sin corregirlos por la inflación y, luego, restarles la tasa de inflación como si

$$i_e = (\text{DCFRR}) - i_i \qquad (25\text{-}114)$$

La ecuación (25-113) muestra que la ecuación (25-114) sólo es aproximadamente cierta y sólo se debe emplear, si acaso, para tasas bajas de interés. Considérese el caso de una (DCFRR) nominal de 5% y una tasa de inflación de 3%. La ecuación (25-114) señala una tasa efectiva de rendimiento de 2% comparada con la tasa efectiva real de 1.94%, expresada con la ecuación (25-113); es decir, hay un error de 3.1%. Considérese ahora el caso de una (DCFRR) nominal de 25% y una tasa de inflación de 23%. La ecuación (25-114) señala una tasa efectiva aproximada de rendimiento de 2%, por comparación con 1.63% de la ecuación (25-113); en este caso, el error es de 22.7%

Inflación, (DCFRR) y periodo de recuperación Se puede lograr un conocimiento adicional del efecto de la inflación sobre los cálculos de (DCFRR), si se tiene en cuenta el periodo de recuperación (PBP), que se define como el tiempo transcurrido necesario para que los flujos positivos de efectivo después de impuestos permitan recuperar el de-

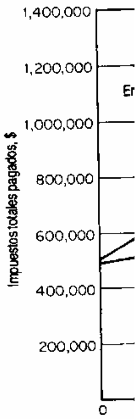


FIG. 25-30 Efecto d

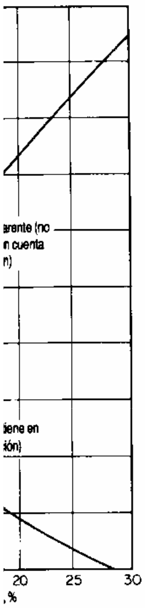
proyecto.

sembolso original e
tivo no están descon
mercado o la tasa de
dado podría dar dive
podría pertenecer a p
Se describiría el
efectuado inmediat
iguales flujos anual
años productivos d
ecuación (25-109) e

(Pl

La relación expre
servar por medio de
como parámetro da
la variable cuyo va
en la figura 25-31,
vida del proyecto r
una (DCFRR) de 2
recuperación. Las l
ción.
Si no hay inflaci
no hay inflación, l
rendimiento con fl
ecuación (25-113).
Cuando hay infl
a la (DCFRR) nom
forma equivalente,

se ve que, para log
es también de 20
de 44%. Ésta es l
podrían trazar en l
tasas de inflación.
Supóngase que
la tiene en cuenta
valor nominal en l
glada a la forma d



alor presente neto de un

(25-112)

2) se convierte en:

(25-113)

ır que es la nominal y considerar que i_e es la

y la mala costumbre, al de retorno o rendi- ninal, con base en los ır la inflación y, luego,

(25-114)

ión (25-114) sólo es r, si acaso, para tasas FRR) nominal de 5% -114) señala una tasa a tasa efectiva real de decir, hay un error de R) nominal de 25% y -114) señala una tasa or comparación con error es de 22.7%

ión Se puede lograr ión sobre los cálculos recuperación (PBP), rio para que los flujos nitan recuperar el de-

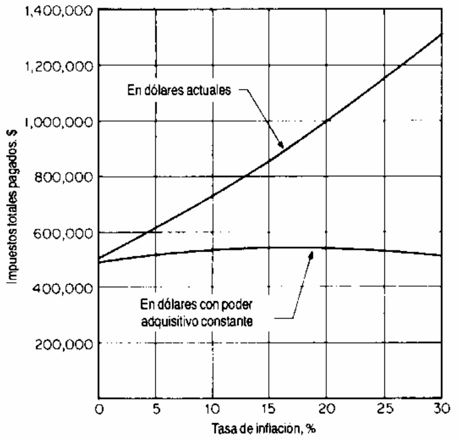


FIG. 25-30 Efecto de la tasa de inflación sobre los impuestos pagados en un proyecto.

sembolso original en capital fijo. En esta definición, los flujos de efectivo no están descontados para tener en cuenta la tasa de intereses en el mercado o la tasa de inflación, de modo que un proyecto con un (PBP) dado podría dar diversos valores para su (DCFRR), y una (DCFRR) dada podría pertenecer a proyectos con diversos periodos de recuperación.

Se describiría el caso simple de 1) un solo desembolso de capital efectuado inmediatamente antes del comienzo de la producción y 2) iguales flujos anuales reales positivos de efectivo, A_{CF}, en todos los años productivos del proyecto. Para este caso, se puede reescribir la ecuación (25-109) en términos de (PBP) y de (DCFRR), como sigue:

$$(\text{PBP}) = \sum_{1}^{n} \frac{1}{[(1 + (\text{DCFRR})]^n} \qquad (25\text{-}115)$$

La relación expresada en la ecuación (25-115) también se puede observar por medio de una cadena de casualidad diferente con (DCFRR) como parámetro dado, (PBP) como variable independiente y n como la variable cuyo valor se busca. Este método es la base para las líneas en la figura 25-31, cada una de las cuales indica en número de años de vida del proyecto requeridos para lograr una tasa efectiva de interés o una (DCFRR) de 20% en proyectos que tienen diferentes periodos de recuperación. Las tres líneas difieren entre sí con respecto a la inflación.

Si no hay inflación, entonces la línea central es la pertiente. Ya que no hay inflación, la (DCFRR) nominal es idéntica a i_r, la tasa real de rendimiento con flujo de efectivo descontado, como se puede ver en la ecuación (25-113).

Cuando hay inflación, el parámetro pertinente es i_e, que es diferente a la (DCFRR) nominal. Cuando se modifica la ecuación (25-113) a la forma equivalente,

$$(\text{DCFRR}) = (1 + i_e)(1 + i_f) - 1$$

se ve que, para lograr una i_e de 20% cuando la tasa general de inflación es también de 20%, un proyecto debe generar una (DCFRR) nominal de 44%. Ésta es la base para la línea superior en la figura 25-31. Se podrían trazar en la misma forma otras líneas correspondientes a otras tasas de inflación.

Supóngase que existe una inflación del 20%, pero que el analista no la tiene en cuenta y considera por error una (DCFRR) del proyecto a su valor nominal en lugar de convertirla a i_e. La ecuación (25-115) rearreglada a la forma de

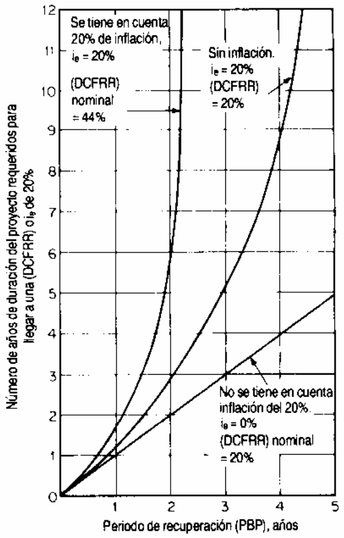


FIG. 25-31 Efecto de la tasa de inflación sobre la relación entre el periodo de recuperación y la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado.

$$i_e = [1 + (\text{DCFRR})]/(1 + i_f) - 1 \qquad (25\text{-}116)$$

muestra que con una (DCFRR) nominal de 20% y una tasa general de inflación de 20%, la tasa real de interés es de cero. Ésta es la base para la línea inferior en la figura 25-31 y se pueden trazar en ella los puntos para otras tasas de inflación, así como también para otros valores para (DCFRR).

En la figura 25-31 se muestra que el tiempo transcurrido necesario para llegar a una (DCFRR) nominal en un proyecto se reduce en forma pronunciada con la inflación. En esa figura, igual que en la figura 25-29, se muestra que el efecto de la inflación es hacer que un proyecto parezca más rentable de lo que es realidad.

La magnitud del efecto se aprecia con más claridad en la figura 25-32, que es un trazo del tiempo necesario para llegar a una (DCFRR) nominal de 20% en contra de la tasa de inflación para diversos valores de (PBP). También se muestra que cuanto más largo sea el periodo de recuperación, mayor es el aumento en la rentabilidad aparente del proyecto.

Las tasas reales de rendimiento, i_e, se pueden calcular con la ecuación (25-116) y se verá que son de 20, 9.09, 0 y -7.69% con tasas de inflación general de 0, 10, 20 y 30%. Por ello, aunque el tiempo requerido para que un proyecto con (PBP) de 4 años llegue a una (DCFRR) nominal de 20% se reduzca desde casi 9 años, cuando no hay inflación, a menos de 3.5 años con 30% de inflación. La tasa real de rendimiento para esta última condición es de -7.69%, lo cual implica que se pierde dinero en ese proyecto, en términos reales.

Es interesante mencionar que, a fin de llegar a una (DCFRR) o i_e reales de 20% con una vida razonable del proyecto, cuando la inflación general es de 20%, se verá en la figura 25-31 que el periodo de recuperación no debe ser mucho mayor de 2 años.

Aunque es difícil llevar a cabo estudios de factibilidad económica de los proyectos en épocas de gran inflación, es importante tratar de predecir las tasas de inflación e incluirlas en los estudios.

Cuando varias personas hablan de la inflación, a menudo utilizan conceptos diferentes sin darse cuenta de ello. Se puede decir que, en muchos casos, el área de incertidumbre conceptual se encuentra en algún sitio entre las líneas superior e inferior (Fig. 25-31).

Inflación y la (MSF) Si se aplica el concepto de la función de supervivencia medida en proyectos de manufactura en vez de que sean de investigación y desarrollo, se puede definir una (MSF) modificada para un proyecto dado como

$$(\text{MSF}) = 1 - (1 - \eta)^{\beta} \qquad (25\text{-}117)$$

En este caso, β es el número de periodos de recuperación que han transcurrido desde que se inició el proyecto para generar flujos netos anuales positivos de efectivo, A_{CF}, hasta llegar a cualquier año dado n desde el comienzo del proyecto. Se expresa con

$$\beta = \frac{\sum_{n=0}^{n=n} (A_{CF})_n}{C_{FC} - S} \qquad (25\text{-}118)$$

Si todos los flujos anuales netos de efectivo en la ecuación (25-118) están basados en su poder adquisitivo en el año 0, entonces β es independiente de la inflación.

En cuanto a la eficiencia de la aportación, η, es la relación entre 1) la ganancia anual real obtenible en un año dado con un volumen dado de ventas y 2) la ganancia que se podría obtener si no hubiera que amortizar capital o pagar intereses y si todas las partidas de gastos fijos no estuvieran cargadas al proyecto. Se define con

$$\eta = [R(c_S - c_{VE}) - A_{FE}]/[R(c_S - c_{VE})] \qquad (25\text{-}119)$$

en donde R son los volúmenes anuales de producción o de ventas en unidades físicas, c_s es el precio de venta por unidad, C_{VE} es el costo variable de producción y venta por unidad y A_{FE} es el costo anual fijo.

Si no se cargan gastos a un proyecto, o sea, que A_{FE} es de cero, entonces η alcanza el máximo valor posible de la unidad. A la inversa, si el proyecto y su volumen de producción están sólo en el punto de equilibrio, entonces η se vuelve cero. Por tanto, la eficiencia de la aportación (llamada a veces contribución) se puede considerar como una medida de la probabilidad de éxito del proyecto.

La relación entre el número de periodos de recuperación, la eficiencia de la aportación y la función de supervivencia medida de la ecuación (25-117), está trazada en la figura 25-33.

La eficiencia de la aportación definida en la ecuación (25-119) puede variar de un año a otro. En tal caso, la ecuación (25-117) se puede escribir en la forma modificada

$$(\text{MSF}) = 1 - [(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n)]^{\beta/n} \qquad (25\text{-}120)$$

en donde $\eta_1, \eta_2 \ldots \eta_n$, son las eficiencias de aportación en los años 1, 2, ... n respectivamente.

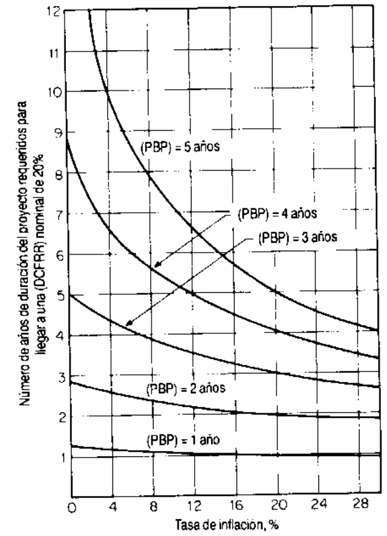


FIG. 25-32 Efecto desfavorable de la inflación para periodos de recuperación más largos.

Igual que en el caso de (MSF) definido por Reul para proyectos de investigación y desarrollo, la administración de una empresa manufacturera tiene la responsabilidad de decidir un grado aceptable de (MSF) en proyectos de manufactura. Esta decisión refleja la actitud de la empresa en relación con el riesgo y ayuda a cuantificarla.

Entonces, (MSF) se debe considerar, en la práctica, como variable dada o predeterminada y, entonces, la ecuación (25-117) se vuelve más útil si se la rearregla. Por ejemplo, los valores de la eficiencia de la aportación para un valor dado de (MSF) están relacionados con los periodos de recuperación transcurridos mediante

$$\eta = 1 - [1 - (\text{MSF})]^{1/\beta} \qquad (25\text{-}121)$$

Si la (MSF) aceptable es 0.9, se puede satisfacer con un proyecto que tenga η = 0.9, β = 1 o con un proyecto que tenga η = 0.684 y β = 2, etc. Una vez utilizada la ecuación (25-121) para calcular la eficiencia de aportación requerida [dados la (MSF) y el número esperado de perio-

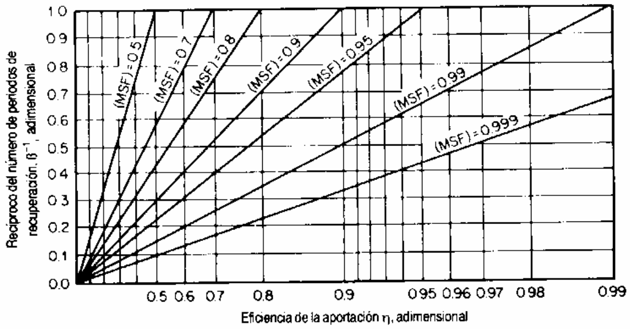


FIG. 25-33 Relación entre función de supervivencia medida, número de periodos de recuperación y eficiencia de la aportación.

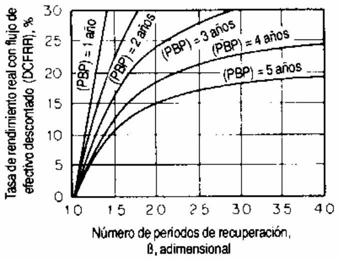


FIG. 25-34 Tasa de rendimiento real con flujo de efectivo descontado en función del número de periodos de recuperación para diversos periodos de recuperación.

dos de recuperación por vida del proyecto], se puede aplicar la ecuación (25-119) para determinar el precio de venta necesario si se conocen R, c_{VE} y A_{FE}. También se puede emplear la ecuación (25-119) para encontrar el volumen requerido de producción, si se conoce c_s.

También es posible combinar las consideraciones de la (MSF) con la (DCFRR) real mediante la ecuación (25-62). La relación de la ecuación (25-59) es independiente de la inflación si todos los valores monetarios están basados en los prevalecientes el año inicial. Para este caso, en la figura 25-34 se muestra la (DCFRR) real alcanzada en un tiempo dado, expresada como el número de periodos de recuperación β transcurridos para diversos valores de dicho periodo.

Considérese un proyecto que tiene una eficiencia de aportación de 0.684 y un periodo de recuperación de 3 años. En la figura 25-33 se muestra que, cuando han transcurrido dos periodos de recuperación, se ha logrado una (MSF) de 0.9. Además, en la figura 25-34 se indica que la tasa de rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) en ese momento es de 24%.

Efectos de la inflación diferencial La inflación puede ser general o diferencial. Con la primera, todos los costos y precios aumentan a una tasa uniforme; con la segunda, los controles gubernamentales y otros factores hacen que los diversos costos y precios se inflen a diferentes tasas.

El comienzo de la inflación general no cambia el valor de la eficiencia de aportación, η, como se puede ver en la ecuación (25-119), y no altera el valor de β si los flujos de efectivo de la ecuación (25-118) se convierten a su poder adquisitivo en el año 0. Por tanto, la inflación general no produce cambios en la función de supervivencia medida (MSF).

Por el contrario, la inflación diferencial puede alterar la función de supervivencia medida. Se supondrá, por ejemplo, que el precio de venta por unidad de producto c_s, en la ecuación (25-119), se congela a un valor constante, pero se permite que aumenten algunos o todos los costos de producción. Esto hace que se reduzca el valor de η y que (MSF) disminuya también, como se puede ver en la ecuación (25-117).

Considérese el efecto de la inflación diferencial sobre la rentabilidad global del proyecto del último ejemplo. El efecto de la inflación general en este proyecto es que la rentabilidad aparente aumenta en forma marcada, hasta un (NPV) de $431 269 con una inflación general del 20%. Sin embargo, cuando los flujos de efectivo del (NPV) se corrigen a su poder adquisitivo en el año 0, entonces el (NPV) se convierte en $208 733.

El efecto de la inflación diferencial en este proyecto se presenta en la figura 25-35, con todos los (NPV) corregidos a su poder adquisitivo en el año 0. La línea superior indica el (NPV) para diversas tasas de inflación general. La línea inferior indica el (NPV) con inflación diferencial, en donde sólo se permite que aumenten los costos pero el precio de venta y el ingreso en efectivo son constantes de un año a otro. La línea central indica el efecto de la inflación general cuando los aumentos de precios se demoran un año. Esta figura confirma que ambas situaciones merman el atractivo del proyecto.

El efecto de los impuestos totales pagados, corregidos a su poder adquisitivo en el año 0, se presenta en la figura 25-36. La inflación diferencial no sólo disminuye la rentabilidad del proyecto sino también los ingresos para el fisco. El método para el cálculo es el mismo que el del ejemplo anterior.

Otro caso de inflación diferencial ocurre cuando los precios de bienes y servicios tienen un aumento uniforme, pero no aumenta la tasa de interés, que es el costo del dinero tomado a préstamo.

Si la tasa fraccionaria de inflación es i_r, se puede corregir una tasa fraccionaria de interés, i_L, a una tasa real mediante la ecuación (25-116) al

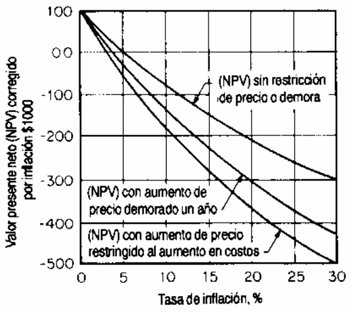


FIG. 25-35 Efecto de la inflación diferencial sobre el valor presente neto corregido por inflación.

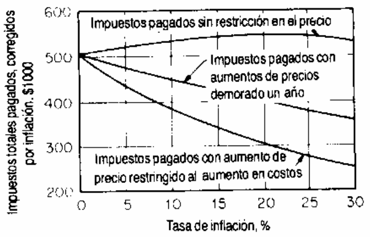


FIG. 25-36 Efecto de la inflación diferencial sobre el pago de impuestos corregido por inflación.

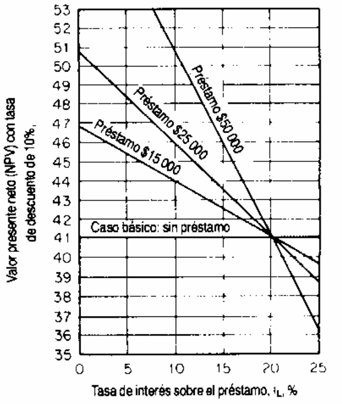


FIG. 25-37 Efecto de la tasa de interés sobre préstamos sobre el valor presente neto de un proyecto.

sustituir (DCFRR) por i_L. El efecto de diversas sumas tomadas a préstamo, con distintas tasas de interés, i_L, sobre el valor presente neto de un proyecto sencillo se presenta en la figura 25-37. Por tanto, si se tomaron a préstamo \$25 000 a una tasa de interés de 15% para ese proyecto, el (NPV) sería de alrededor de \$43 000 con tasa cero de inflación. Pero si la inflación, i_i, de bienes y servicios es de 10%, se puede calcular con la ecuación (25-116), que la tasa real de interés sobre ese préstamo será de sólo 4.55%. Se puede ver en la figura 25-37 que esto aumenta el (NPV) del proyecto a \$48 000, lo que confirma la ventaja económica de tomar préstamos a una tasa fija de interés en épocas de inflación general.

Un aspecto típico de la inflación diferencial es la cuestión de los costos de energía. ¿Subirán o bajarán los costos de un combustible determinado en relación con los precios en general y, si es así, qué efectos tendrá en los factores económicos de un proyecto?

Ejemplo 17 Una unidad de un proceso tiene calentamiento con gas. Se supone que \$100 invertidos en sistemas para conservación de energía para esa unidad al final de 1980, ahorrarían 200 termias (21.1 GJ) de energía de gas en cada año subsecuente. Si el costo del gas en 1980 fue de \$$x$ por termia, el ahorro anual en dinero, a los precios de 1980, será de \$200x. El (NPV) al final del año n en este proyecto es:

$$(\text{NPV}) = -100 + \sum_{1}^{n} \frac{(200)x}{(1 + i)^n}$$

si el factor de descuento es i.

Lo anterior es independiente de la inflación, siempre y cuando el costo del gas aumente al mismo régimen que la tasa general de inflación. Sin embargo, si el costo real del gas aumenta a una tasa fraccional anual r por arriba de la tasa de inflación general, se debe modificar a:

$$(\text{NPV}) = -100 + \sum_{1}^{n} \frac{(200x)(1 + r)^n}{(1 + i)^n}$$

Esta ecuación confirma que según aumenta el precio del gas con la inflación, también sube el atractivo del sistema para conservación de energía.

CONTABILIDAD Y CONTROL DE COSTOS

Principios de contabilidad La contabilidad es la ciencia de registrar las transacciones de los negocios en una forma sistemática. Los estados financieros son la base para las decisiones de la administración y reflejan los resultados de las mismas. Esos estados pueden decir a los administradores o a los ingenieros mucho en cuanto a la empresa, siempre y cuando sepan interpretar correctamente la información.

Ya que una asignación o prorrateo de costos requiere amplios conocimientos técnicos de las operaciones en las industrias de procesos químicos, los ingenieros de proceso y los contadores deben trabajar en estrecha colaboración. El éxito de la empresa depende de la combinación de conocimientos y pericias técnicas, financieras y administrativas.

La contabilidad es también el idioma de los negocios y los diferentes departamentos administrativos de una empresa la utilizan para comunicarse en una amplia gama de términos financieros y de costos. Los ingenieros que participan en los estudios de factibilidad y en evaluaciones detalladas de los procesos, dependen de los contadores de la empresa para la información financiera, en especial acerca de la forma en la cual se pretende hacer la asignación de los costos indirectos. Es indispensable que los ingenieros interpreten en forma correcta esa información y que puedan, si es necesario, explicar a los contadores el efecto de los métodos seleccionados para la asignación.

El método para asignar los costos indirectos puede tener un efecto considerable en los costos asignados a un proyecto y, por tanto, en los flujos de efectivo aparentes para el mismo. Ya que estos flujos de efectivo se utilizan para calcular la rentabilidad mediante los métodos del valor presente neto (NPV) y de la tasa de rendimiento con flujos de efectivo descontados (DCFRR), la asignación arbitraria de los costos indirectos puede dar por resultado una elección incorrecta entre proyectos alternos.

Los ingenieros, además de entender los principios de contabilidad y tener un conocimiento práctico de las técnicas, deben pensar en posibles inexactitudes en la información contable, en la misma forma en que tienen en cuenta posibles errores en algún dato técnico.

A primera vista, el lenguaje contable les puede parecer ilógico a los ingenieros. Aunque los contadores producen estados de operaciones en forma tabular, la base de toda contabilidad es:

$$\text{Capital} = \text{activo} - \text{pasivo} \qquad (25\text{-}122)$$

La ecuación (25-122) también se puede escribir como:

$$\text{Activo} = \text{capital} + \text{pasivo} \qquad (25\text{-}123)$$

El capital, con frecuencia referido como el valor neto, es el valor en dinero de lo que posee el negocio, mientras que el pasivo es el valor en dinero de lo que adeuda el negocio.

Muchos ingenieros tienen dudas de que el capital (patrimonio) sea un pasivo. Esto se explica con facilidad porque una empresa o negocio es una entidad legal (persona jurídica) por su propio derecho, que debe dinero a las personas que son las propietarias. Este entendimiento es esencial en grandes empresas con accionistas y el término capital se utiliza lo mismo para un propietario que es persona física o para una persona jurídica, como una sociedad. Si una persona invierte \$10 000 para iniciar un negocio, entonces el negocio tiene un pasivo de \$10 000 que tendrá que pagar a la persona.

Es todavía más difícil pensar que las utilidades sean un pasivo. Las utilidades (que en términos contables tienen una definición diferente que en términos de economía) son el aumento en valor monetario disponible para distribución a los propietarios y representan los intereses obtenidos sobre el capital. Si no se distribuyen las utilidades, representan un incremento del capital en el concepto normal del interés compuesto. Por tanto, si el negocio propiedad de una sola persona logra una utilidad de \$5000, entonces el pasivo del negocio con la persona aumentará a \$15 000. Teniendo presente este concepto, la ecuación (25-123) se puede ampliar a:

$$\text{Activo} = \text{capital} + \text{pasivo} + \text{utilidades} \qquad (25\text{-}124)$$

en donde el capital se considera como la inversión en efectivo en el negocio y se diferencia de la utilidad resultante en la misma forma que se separan la suma principal y los intereses.

Las utilidades son la diferencia entre los ingresos totales en efectivo por ventas y el total de todos los costos y gastos en que se incurre para efectuar las ventas. Con esta definición, la ecuación (25-124) se puede ampliar todavía más para incluir:

$$\begin{aligned}&\text{Activo} + \text{gastos}\\ &\quad = \text{capital} + \text{pasivo} + \text{ingresos por ventas} \qquad (25\text{-}125)\end{aligned}$$

Los ingenieros tienen una mayor dificultad al considerar que un gasto es equivalente a un activo, como se implica en la ecuación (25-125). Considérese el caso de un negocio propiedad de una sola persona. Se supone, para un periodo dado, una utilidad de \$5000 y gastos totales de \$8000 sin incluir el salario de la persona. También se supone que el propietario recibe \$12 000 en pago de su trabajo durante este periodo. Los ingresos por ventas requeridos serían \$25 000. En la práctica, la persona ha tenido un ingreso personal de \$17 000 en el periodo, pero lo ha prorrateado entre el negocio en forma de \$12 000 de gastos como sueldo y \$5000 de rendimiento del capital. En las empresas grandes, habrá personas que perciben sueldos pero no poseen acciones y, por

tanto, no perciben utilidades, y también habrá accionistas que perciben utilidades pero no cobran un sueldo. Entonces, la diferencia entre gastos y utilidades es muy práctica.

Los estados financieros de la empresa suelen abarcar un año, pero los detalles a partir de los cuales se preparan esos estados se asientan todos los días en el libro diario. El diario es una anotación cronológica de todas las transacciones del negocio y se incluyen los detalles del ingreso o gasto correspondientes. En los negocios muy pequeños esto puede ser suficiente, pero en muchos casos, el carácter no sistemático del libro diario puede originar errores en los cálculos. Por ello se acostumbra llevar en otro libro, llamado mayor, cuentas relacionadas con transacciones específicas, por ejemplo, "compra de combustible". En esta cuenta se asentaría el costo de cada compra de combustible y su fecha, tomados del diario.

Principios de la contabilidad por partida doble Muchas de las cuentas se emplean para registrar ingresos y gastos. Se acostumbra llevar esas cuentas con el sistema de partida doble (a cada cargo corresponde un abono) que se resume con:

$$\text{Cargos} = \text{abonos} \tag{25-126}$$

El principio de la partida doble data del siglo XV y se basa en la premisa de que en cada transacción hay alguien que da algo y alguien que recibe algo de valor. La partida doble requiere que cada transacción se asiente en dos cuentas; se acostumbra abonar a la cuenta de quien da o entrega y cargar a la cuenta de quien lo recibe, esa misma cantidad, de acuerdo con el libro diario. Para conveniencia, esa cuenta está dividida en el centro en la clásica forma de "T" y las partidas de cargo o débito se asientan en el lado izquierdo. También se acostumbra utilizar una referencia cruzada al asiento de diario para poder verificar si hay errores u omisiones.

Considérese que la compañía A compra $50 000 de equipo para la planta y lo paga con un cheque. Los asientos son un cargo de $50 000 en la cuenta de equipo de la planta y un abono de $50 000 a la cuenta del banco. Entonces se dice que la cuenta de equipo tiene un saldo deudor de $50 000 y la cuenta del banco tiene un saldo acreedor de $50 000, si esos son los únicos asientos.

Si esa compañía A vende $100 000 de producto que le pagan con cheque, los asientos contables son abono de $100 000 a la cuenta de ventas y cargo de $100 000 a la cuenta del banco. Entonces, la cuenta del banco tendrá un saldo deudor de ($100 000 – $50 000) = $50 000 y la cuenta de ventas un saldo acreedor de $100 000, si sólo se hicieron esos asientos en el periodo contable.

En principio, los cargos (débitos) y abonos (créditos) a las cuentas son muy sencillos. Sin embargo, como en todo, se necesita una gran cantidad de práctica para adquirir habilidad. No se requiere que los ingenieros compitan con los contadores, pero sí deben saber lo que hacen los contadores y por qué lo hacen.

De las cuentas mencionadas en el ejemplo precedente, las cuentas de equipo de planta y de banco son cuentas de activo; la cuenta de ventas es de pasivo. Para aumentar un activo, se hace un cargo en la cuenta de activo; para aumentar un pasivo, se hace un abono en la cuenta de pasivo. A la inversa, para reducir un activo se hace un abono en la cuenta de activo; para reducir un pasivo, se hace un cargo en la cuenta de pasivo.

Cierre de libros Al final del periodo contable, se compensan las cuentas individuales entre sí, para cerrarlas de acuerdo con la ecuación (25-126). Los saldos se traspasan al balance en el caso de desembolsos de capital o al estado de pérdidas y ganancias en el caso de desembolsos de los ingresos. Otro nombre que se da al balance es el de estado de situación financiera; a veces, el estado de pérdidas y ganancias se le llama estado de resultados.

La finalidad de un desembolso de capital, como la compra de un equipo de planta en $50 000, es lograr futuros ingresos. Por contraste, un desembolso de ingresos o gastos es para continuar con las operaciones.

TABLA 25-15 Estado de pérdidas y ganancias, Compañía ABC

Ingresos		
Ingresos por ventas	$1 900 000	
Otros ingresos	100 000	
		$2 000 000
Gastos		
Materia prima	953 000	
Sueldos y salarios	185 000	
Servicios generales	44 000	
Depreciación	68 000	
Otros gastos	376 000	
Impuesto sobre la renta	194 000	
		1 820 000
Utilidad neta (después de impuestos)		$ 180 000

Los desembolsos de ingresos incluyen los costos de material directo y de mano de obra directa para la manufactura de un producto, junto con los costos indirectos relativos que incluyen el mantenimiento de la planta. Ya que esos desembolsos son débitos y se cargan en las cuentas respectivas, el saldo deudor en un periodo dado se obtiene al sumar los saldos deudores de cada cuenta de gastos. En forma similar, ya que los ingresos por ventas y otros ingresos son partidas de abono, los saldos acreedores en un periodo determinado se obtienen al sumar los saldos de cada cuenta de ingresos.

Para determinar la utilidad o la pérdida (calculadas como los ingresos menos los gastos en un periodo contable dado), hay que hacer coincidir los gastos con los ingresos. Por ejemplo, un alquiler pagado, no se debe incluir en el cálculo de pérdidas y ganancias. En forma similar, los artículos vendidos pero no cobrados todavía en ese periodo contable no se deben incluir en el total de ingresos para dicho periodo.

El estado de pérdidas y ganancias (Tabla 25-15) se emplea para determinar las utilidades o pérdidas en un periodo dado. Los saldos deudores y acreedores de todas las cuentas que no representan gastos o ingresos en un periodo contable dado se incluyen como activos y pasivos en el balance (Tabla 25-16).

No hay un formato fijo para el estado de pérdidas y ganancias o para el balance. En las tablas 25-15 y 25-16 se presentan los formatos más comunes, pero no son los únicos. Por ejemplo, también se utilizan los balances con distribución vertical (llamados a veces forma de reporte), en que se enumeran el activo, pasivo y capital en forma vertical.

Algunos desembolsos son, a la vez, de capital y de ingresos. Por ejemplo, se puede efectuar un trabajo simultáneo de reparaciones y de mejoras en una planta. En este caso, las reparaciones se consideran como desembolsos de ingresos (gastos) y las mejoras a la planta como desembolsos de capital.

Conceptos y convenciones contables La contabilidad está basada en los siguientes conceptos: 1) medición del dinero o recursos, 2) entidad, 3) negocio en marcha, 4) costo y 5) concordancia.

Concepto 1. "Medición del dinero" significa que sólo se registran los aspectos que se pueden representar en términos monetarios. El balance y el estado de pérdidas y ganancias de una empresa no dan alguna indicación de lo que pueda ocurrir en el futuro. La empresa puede estar a punto de perder una demanda por una fuerte suma de dinero o un competidor puede lanzar un nuevo producto que reducirá en forma seria las futuras ventas de los productos de esa empresa.

Concepto 2. "Entidad" significa que la contabilidad se lleva para la empresa con independencia de las personas que sean sus propietarias. Por ejemplo, si una persona invierte $10 000 adicionales en su propio negocio, las cuentas indicarán que el negocio está $10 000 más rico, pero no muestran que la riqueza personal del propietario se haya reducido en $10 000.

Concepto 3. "Negocio en marcha" significa que la contabilidad está basada en la premisa de que el negocio continuará por tiempo indefinido. Es muy improbable que los valores del activo que aparecen en el balance sean la suma que se realizaría al venderlos. En la conta-

bilidad normal no se hace ningún intento por medir el valor del negocio para un comprador potencial.

Concepto 4. "Costo" significa que los activos, por lo general, se presentan en el balance al precio de costo y la depreciación correspondiente. Algunos activos, como los terrenos, pueden tener un valor mucho mayor que cuando se compraron, pero no se suele indicar en el balance. Sin embargo, las leyes fiscales de algunos países exigen una nota en que se manifieste el valor estimado actual de los terrenos.

Concepto 5. "Concordancia" significa que los ingresos en un periodo contable dado deben corresponder a los gastos en el mismo periodo.

La contabilidad también está basada en las siguientes convenciones: **1)** importancia relativa, **2)** conservatismo o prudencia y **3)** congruencia (llamada también "consistencia").

La importancia relativa se relaciona con la determinación de si ciertos gastos tendrán un efecto importante en los procedimientos contables de una empresa, cuestión que debe determinar cada empresa. Por supuesto, la compra de un vehículo es una partida importante pero la papelería o las herramientas para mantenimiento tienen menor importancia relativa. Aunque esos artículos puedan durar más allá del periodo contable actual, quizá no valga la pena el trabajo contable de registrarlos como artículos de importancia relativa. En algunas empresas considerarán un artículo particular como capital, y en otras como un gasto. Por supuesto, la compra de un equipo que cueste, por ejemplo, $1000 tendrá menos importancia relativa para una empresa gigante que para un negocio pequeño.

El conservatismo o prudencia significa valores monetarios que tienden a subestimar en vez de sobreestimar las utilidades.

Congruencia (o "consistencia") significa que las partidas contables se tratan en la misma forma durante un número indefinido de años. Por ejemplo, una partida determinada no se consideraría como gasto en un año y como partida de capital al año siguiente, sin que haya alguna buena razón para ello.

Balance El balance, llamado también estado de situación financiera, es un informe contable de las finanzas de una empresa en un momento dado en el tiempo. En la tabla 25-16 se presenta un balance típico. Aunque un balance tiene dos lados, no es parte del sistema de partida doble. En realidad, no es una cuenta sino un estado en el que se incluyen todos los activos de una empresa y los diversos créditos contra esos activos en la fecha del cierre de libros. Los activos deben ser iguales a los créditos en contra de ellos en todo momento. Quienes tienen créditos o derechos en contra de los activos son los propietarios (o los accionistas en una sociedad por acciones) o las personas a las que se les adeuda dinero. En este último caso, se dice que la empresa tiene pasivo o créditos en favor de los acreedores. La totalidad de los derechos en contra de los activos se llama a menudo "pasivo y capital contable".

Los activos se clasifican como circulantes o fijos y los pasivos como circulantes o a largo plazo. Los activos fijos son los bienes materiales que tienen una larga duración e incluyen terrenos, edificios, equipo de planta, vehículos, etc. Se tienen con la finalidad específica de obtener ingresos y no están a la venta en el curso normal de las operaciones. El activo circulante incluye efectivo en caja y bancos y otras partidas que se pueden convertir con facilidad en efectivo, como el inventario de materia prima. Al contrario del activo fijo, el activo circulante se adquiere con el propósito específico de convertirlo en efectivo en el curso normal de las operaciones. Sin embargo, lo que en un tipo de empresa se considera activo fijo, en otra sería activo circulante. Por ejemplo, una empresa de productos químicos clasificaría sus vehículos como activo fijo; pero una empresa que se dedica a la compraventa de vehículos los contabilizaría como activo circulante.

De manera similar, la diferencia entre pasivo circulante y a largo plazo no está definida con claridad. El pasivo circulante incluye cuentas por pagar a acreedores y proveedores, impuestos por pagar, dividendos por pagar, etc., si vencen en el plazo de un año. El pasivo a largo plazo incluye impuestos diferidos, bonos, pagarés, etc., que no se tienen que pagar en el plazo de un año. El capital contable incluye el valor a la par o nominal del capital recibido de los accionistas y cualesquiera utilidades retenidas. En el balance sólo se indica el valor nominal pero no el valor real o actual del capital.

El balance incluye también partidas que no se consideran normalmente como activo o pasivo, tales como gastos pagados por anticipado y utilidades acumuladas.

Los contadores consideran el activo como recursos que todavía no se han utilizado y se suelen presentar en el balance al costo, menos la depreciación acumulada. En este sentido, los cargos por depreciación en un periodo contable son el medio para convertir una parte de un activo en un gasto corriente que, luego, se presenta como gasto en el estado de pérdidas y ganancias.

Considérese un equipo para la planta que costó $1 millón y se compró el 1 de enero de 1978. En la tabla 25-17 se presenta la provisión para depreciación en línea recta para 1978, 1979 y 1980, en el supuesto de una vida útil de 10 años y cero valor como desecho. Los asientos de abono de $100 000 por depreciación anual se compensan con cargos a la partida de pérdidas y ganancias por $100 000 en el estado de pérdidas y ganancias en cada año. En la tabla 25-18 se indican las corres-

TABLA 25-16 Balance general, Compañía XYZ

Activo ($ miles)		Pasivo y capital ($ miles)	
Activo circulante		**Pasivo y circulante**	
Efectivo	$ 38 893	Documentos por pagar	$ 34 507
Documentos y cuentas por cobrar	110 740	Cuentas por pagar y pasivo acumulado	106 433
Inventario:		Impuestos por pagar	7 264
Productos terminados	17 396	Total pasivo circulante	148 204
Trabajo en proceso	56 690		
Materia prima y suministro (al costo)	35 790	**Pasivo a largo plazo**	67 677
Total de inventario	109 876	Impuestos diferidos	13 225
Total activo circulante	259 509	Otros créditos diferidos	2 307
Inversiones y cuentas por cobrar a largo plazo (al costo)	94 009	**Capital contable**	
		Acciones comunes, $20 valor nominal	
Propiedades, planta y equipo (al costo)		Acciones autorizadas, 7 750 000	
Terrenos	6 110	Acciones en circulación, 4 794 450	95 889
Edificios	63 848	Capital en exceso de valor nominal de las acciones comunes	31 798
Maquinaria y equipo	106 185	Utilidades retenidas	101 492
	176 143	Total capital contable	229 179
Menos; depreciación acumulada	75 163		
Propiedades, planta y equipo, netos	100 980		
Gastos anticipados y cargos diferidos	6 094		
Total del activo	$460 592	Total pasivo y capital	$460 592

jue la empresa tiene
ıtalidad de los dere-
ıasivo y capital con-

s y los pasivos como
ıs bienes materiales
edificios, equipo de
ıpecífica de obtener
: las operaciones. El
y otras partidas que
mo el inventario de
vo circulante se ad-
ıefectivo en el curso
ı un tipo de empresa
lante. Por ejemplo,
ıus vehículos como
compraventa de ve-

circulante y a largo
lante incluye cuen-
ıtos por pagar, divi-
ño. El pasivo a largo
ı, etc., que no se tie-
able incluye el valor
iistas y cualesquiera
l valor nominal pero

consideran normal-
ıados por anticipado

rsos que todavía no
e al costo, menos la
os por depreciación
rtir una parte de un
ta como gasto en el

$1 millón y se com-
resenta la provisión
1980, en el supuesto
cho. Los asientos de
pensan con cargos a
ı el estado de pérdi-
: indican las corres-

	$ 34 507
	106 433
	7 264
	148 204
	67 677
	13 225
	2 307
	95 889
ınes	31 798
	101 492
	229 179
	$460 592

TABLA 25-17 Cuenta de provisión para depreciación de equipo de planta

1978			
		Ene. 1 Saldo anterior	0
Dic. 31 Saldo arrastrado	$100 000	Dic. 31 Cargo a pérdidas y ganancias	$100 000
1979			
		Ene. 1 Saldo anterior	$100 000
Dic. 31 Saldo arrastrado	$200 000	Dic. 31 Cargo a pérdidas y ganancias	100 000
	$200 000		$200 000
1980			
		Ene. 1 Saldo anterior	$200 000
Dic. 31 Saldo arrastrado	$300 000	Dic. 31 Cargo a pérdidas y ganancias	100 000
	$300 000		$300 000

pondientes partidas del balance para los años 1978, 1979 y 1980. Las partidas de los años siguientes se presentan en la misma forma.

Un balance sólo es fiel en un punto particular en el tiempo, pues no dice nada de las tendencias en una empresa. Sin embargo, si se comparan los balances de años subsecuentes, la administración puede observar los cambios en las diversas partidas. Si la tendencia observada es indeseable, la administración debe tomar una acción correctiva. Dado que el periodo contable de un año es muy largo en gran número de empresas, se acostumbra hacer balances con mayor frecuencia para fines de control. Éstos pueden ser menos formales que los incluidos en el informe anual a los accionistas. En general, los balances son menos útiles para la administración que los estados de pérdidas y ganancias (estados de resultados).

Estado de pérdidas y ganancias Los estados de pérdidas y ganancias van desde los muy sencillos (Tabla 25-15) hasta los más complejos y con mayor información (Tabla 25-19). En el estado de pérdidas y ganancias se presentan los ingresos y los gastos correspondientes para el logro de esos ingresos en cierto periodo. Es la medida más clara de la eficiencia de una empresa. Aunque los estados de pérdidas y ganancias que se dan a conocer a los accionistas suelen abarcar un año, en muchas empresas se preparan estados mensuales para fines internos.

Dichos estados son instrumentos muy útiles para ayudar a la administración a controlar la empresa y a planear para el futuro. Dado que la administración debe vigilar la tendencia de los gastos normales, entonces los gastos extraordinarios, por ejemplo, las pérdidas sufridas por un incendio o una inundación, se deben presentar por separado.

Si no hay concordancia entre los ingresos y los gastos, pueden ocurrir una subestimación o una sobreestimación de las utilidades. Si la materia prima se compró a un costo menor que el vigente, habrá sobreestimación de utilidades y significará un mayor pago de impuestos.

Una de las partidas más importantes en el estado de pérdidas y ganancias es la depreciación. Aunque no se debe pensar que sea un medio para crear un fondo de reposición de la planta, permite sin embargo retener dinero en el negocio, porque reduce las utilidades disponibles para distribución a los accionistas. Por supuesto, tanto la administra-

TABLA 25-18 Partidas en el balance

A Dic. 31, 1978		
Equipo de planta al costo	$1 000 000	
Menos: Depreciación a la fecha	100 000	
		$900 000
A Dic. 31, 1979		
Equipo de planta al costo	$1 000 000	
Menos: Depreciación a la fecha	200 000	
		$800 000
A Dic. 31, 1980		
Equipo de planta al costo	$1 000 000	
Menos: Depreciación a la fecha	300 000	
		$700 000

ción como los contadores tienen la obligación de que se retenga suficiente dinero en la empresa para la reposición de activos y para invertirlo en otros procesos o en inversiones externas.

Otra obligación de la administración y de los contadores es cerciorarse de que siempre se tenga suficiente capital de trabajo para llevar a cabo las operaciones.

Tipos de contabilidad La labor tradicional de los contadores ha sido preparar los balances y estados de pérdidas y ganancias. Hoy, los contadores se ocupan cada vez más de la planeación para el futuro. La contabilidad moderna se puede dividir en dos ramas: contabilidad financiera y contabilidad administrativa o de costos.

La contabilidad financiera se ocupa de la administración e incluye la preparación de balances y estados de pérdidas y ganancias que reflejen los intereses de los accionistas y que cumplan con las disposiciones fiscales. Los impuestos son un importante elemento en la contabilidad financiera.

La contabilidad administrativa se ocupa de la toma de decisiones y el control. Es la rama de la contabilidad que más interesa a casi todos los ingenieros de procesos. También se relaciona con los costos estándar, control de presupuestos y decisiones para inversión.

Los estados contables sólo presentan hechos que se pueden expresar en términos financieros, pero no dicen si una empresa tiene nuevos productos en etapa de desarrollo que le aseguren su futuro. Una empresa puede tener un estado financiero impresionante y, sin embargo, ir camino a la bancarrota en unos pocos años si no se ha previsto la introducción de suficientes productos o servicios nuevos.

Financiamiento del activo con capital propio y deuda

Relaciones (razones) financieras La relación que quizá se emplea más es el margen de utilidad (PM) definido como:

$$(PM) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{ingresos por ventas anuales}}\ 100 \qquad (25\text{-}127)$$

Otra relación común es el rendimiento sobre la inversión (ROI) que se define como

$$(ROI) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{inversión}}\ 100 \qquad (25\text{-}128)$$

En las ecuaciones (25-127) y (25-128), la utilidad neta anual puede ser antes o después de impuestos. También puede incluir los intereses y dividendos por cobrar, etc.

Por supuesto, la utilidad neta anual se debe definir con claridad antes de hacer comparaciones con otras empresas. Asimismo, el término "inversión" de la ecuación (25-128) puede tener diversos significados; los dos que más se utilizan, para evaluar la rentabilidad de una empresa y no la de los proyectos, son el activo total y el capital propio o contable. En el primer caso, la ecuación (25-128) se puede escribir como:

TABLA 25-19 Estado de pérdidas y ganancias para un año maduro de un nuevo producto químico, del que se producen 10 millones lb/año

			Valores unitarios, cents/lb	Ingresos por ventas, %
Ingresos por ventas anuales A_S		$2 000 000	20.00	100.0
Gastos directos de manufactura A_{DME}				
Materia prima	$ 884 000		8.84	44.2
Catalizadores y disolventes	69 000		0.69	3.4
Mano de obra directa	102 000		1.02	5.1
Supervisión	20 000		0.20	1.0
Servicios generales	22 000		0.22	1.1
Mantenimiento	21 000		0.21	1.1
Suministros	4 000		0.04	0.2
Regalías y patentes	10 000		0.10	0.5
Total A_{DME}	$1 132 000	$1 132 000	11.32	56.6
Gastos indirectos de manufactura A_{IME}				
Nómina directa	28 000		0.28	1.4
Laboratorio central	10 000		0.10	0.5
Gastos indirectos generales	52 000		0.52	2.6
Empaque y almacenamiento	22 000		0.22	1.1
Impuesto predial	14 000		0.14	0.7
Seguros	6 000		0.06	0.3
Total A_{IME}	$ 132 000	$ 132 000	1.32	6.6
Gastos totales de manufactura (no incluye depreciación) A_{ME}		$1 264 000	12.64	63.2
Depreciación A_{BD}		68 000	0.68	3.4
Otros gastos				
Administración	74 000		0.74	3.7
Ventas y embarque	124 000		1.24	6.2
Publicidad y mercadotecnia	40 000		0.40	2.0
Servicio técnico	10 000		0.10	0.5
Investigación y desarrollo	60 000		0.60	3.0
Total otros gastos	308 000	308 000	3.08	15.4
Gastos totales A_{TE}		$1 640 000	16.40	82.0
Utilidad neta anual A_{NP}		$360 000	3.60	18.0

$$(\text{ROA}) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{inversión}}\,100 \qquad (25\text{-}129)$$

en donde (ROA) se llama rendimiento sobre el activo. En el segundo caso, la ecuación (25-128) se puede escribir como

$$(\text{ROE}) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{capital contable}}\,100 \qquad (25\text{-}130)$$

en donde (ROE) es el rendimiento sobre el capital.

La relación de rotación de activos (ATR) es una medida común del rendimiento de una empresa y se define como:

$$(\text{ATR}) = \frac{\text{ingreso por ventas anuales}}{\text{activo total}}\,100 \qquad (25\text{-}131)$$

La comparación de las ecuaciones (25-127), (25-129) y (25-131), indica que

$$(\text{ROA}) = (\text{ATR})\,(\text{PM}) \qquad (25\text{-}132)$$

Entonces, (ROA) se puede mejorar si se aumentan (ATR) o (PM). Una variante de la ecuación (25-131) es la relación de rotación de activo fijo (FATR), definida como:

$$(\text{FATR}) = \frac{\text{ingreso por ventas anuales}}{\text{activo fijo}}\,100 \qquad (25\text{-}133)$$

Desde luego, (FATR) tiene menor valía que (ATR) cuando se utiliza en empresas que tienen sumas importantes de capital de trabajo. La (FATR) es la inversa de la relación de capital (CR) para proyectos individuales y ésta se define como:

$$(\text{CR}) = C_{FC}/A_S \qquad (25\text{-}134)$$

en donde C_{FC} es el costo del capital fijo para un proyecto que se inicia con la compra del terreno y A_S son los ingresos por ventas anuales.

El activo fijo de la ecuación (25-133) y los incluidos en el activo total en las ecuaciones (25-129) y (25-131) se suelen considerar a su valor depreciado o en libros, que puede diferir mucho de su valor de mercado. Ésta es una desventaja del empleo de las ecuaciones (25-129), (25-131) y (25-133).

Los ingresos por ventas anuales incluidos en las ecuaciones (25-127), (25-131) y (25-133) se consideran como la rotación bruta, que incluye ventas intercompañía; sin embargo, estas ventas se eliminan en las cuentas consolidadas o del grupo de empresas. También en este caso, el ingreso por ventas anuales se debe definir con claridad antes de poder hacer comparaciones con otras empresas.

Con relación al balance simplificado o estado de situación financiera que aparece en la tabla 25-20, el activo total está relacionado con el capital contable y el pasivo o deuda total mediante:

$$\text{Activo total} = \text{capital contable} + \text{deuda total} \qquad (25\text{-}135)$$

La ecuación (25-135) también se puede escribir:

$$\text{Capital contable} = \text{activo total} - \text{deuda total} \qquad (25\text{-}136)$$

Las ecuaciones (25-130) y (25-136) se pueden combinar para dar:

$$(\text{ROE}) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{activo total} - \text{deuda total}}\,100 \qquad (25\text{-}137)$$

La ecuación (25-137) también se puede escribir para que incluya una cantidad llamada relación de deuda (DR) que señala:

$$(\text{ROE}) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{activo total}}\left[\frac{100}{1-(DR)}\right] \qquad (25\text{-}138)$$

en donde (DR) es la relación de deuda expresada por

$$(\text{DR}) = \frac{\text{deuda total}}{\text{activo total}} \qquad (25\text{-}139)$$

El rendimiento sobre el activo (ROA) también se puede relacionar con el rendimiento sobre el capital (ROE), al combinar las ecuaciones (25-129) y (25-138):

$$(\text{ROA}) = (\text{ROE})/[1-(\text{DR})] \qquad (25\text{-}140)$$

(25-132)

ntan (ATR) o (PM).
ón de rotación de ac-

es 100 (25-133)

TR) cuando se utiliza
apital de trabajo. La
t) para proyectos in-

(25-134)

un proyecto que se
ingresos por ventas

idos en el activo total
considerar a su valor
le su valor de merca-
ciones (25-129), (25-

las ecuaciones (25-
i rotación bruta, que
s ventas se eliminan
sas. También en este
ir con claridad antes
s.
le situación financie-
á relacionado con el
e:

da total (25-135)

r:

da total (25-136)

combinar para dar:

100 (25-137)

bir para que incluya
señala:

(25-138)

por

(25-139)

se puede relacionar
ibinar las ecuaciones

(25-140)

TABLA 25-20 Balances simplificados de Compañías X y Y

Balance de la Compañía X

		Deuda total	0
		Capital contable	$100 000
Activo total	$100 000	Total pasivo y capital	$100 000

Balance de Compañía Y

		Deuda total	$ 50 000
		Capital contable	$ 50 000
Activo total	$100 000	Total pasivo y capital	$100 000

TABLA 25-21 Rendimiento sobre el capital después de impuestos de las Compañías X y Y

(ROA) antes de impuestos	5%	10%	15%	20%
	Compañía X			
A_{NP}	$5 000	$10 000	$15 000	$20 000
Menos: Impuestos al 50%	($2 500)	($ 5 000)	($ 7 500)	($10 000)
A_{NNP}	$2 500	$ 5 000	$ 7 500	$10 000
(ROE) después de impuestos	2½%	5%	7½%	10%
	Compañía Y			
A_{NP} antes de intereses	$5 000	$10 000	$15 000	$20 000
Menos: Intereses	($5 000)	($ 5 000)	($ 5 000)	($ 5 000)
A_{NP} después de intereses	0	$ 5 000	($10 000)	$15 000
Menos: Impuestos al 50%	0	($ 2 500)	($ 5 000)	($ 7 500)
A_{NNP}	0	$ 2 500	$ 5 000	$ 7 500
(ROE) después de impuestos	0	5%	10%	15%

(ROE) se puede relacionar también con la relación de rotación de activo (ATR) y con el margen de utilidad (PM), al combinar las ecuaciones (25-132) y (25-140):

$$(ROE) = [(ATR)(PM)]/[1 - (DR)] \qquad (25\text{-}141)$$

Financiación con deuda o apalancamiento La relación de deuda (DR) se conoce también como relación de apalancamiento. Las empresas con apalancamiento elevado tienen una elevada relación entre la deuda y el activo total. A primera vista, puede parecer que el empleo del apalancamiento es una forma sencilla de aumentar el rendimiento sobre el capital (ROE). Sin embargo, hay que pagar intereses sobre la deuda. Que el apalancamiento sea o no cosa buena dependerá de los cargos exactos por intereses en relación con el rendimiento sobre el activo (ROA) y el rendimiento sobre el capital (ROE).

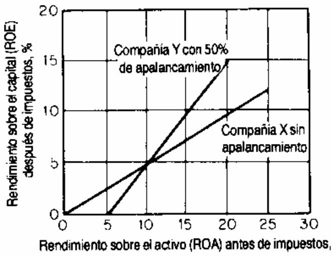


FIG. 25-38 Efecto del apalancamiento sobre el rendimiento del capital.

Considérense los balances simplificados de las compañías X y Y (Tabla 25-20). Esas compañías X y Y tienen una relación de deuda o apalancamiento de cero y 0.5 respectivamente. Supóngase que la deuda es del tipo con obligaciones para fines fiscales y que la tasa de interés anual es de 10%. El (ROE) después de impuestos se presenta en la tabla 25-21 para esas compañías, para diversos valores de utilidad neta anual, A_{NP} antes de impuestos. A_{NNP} es la utilidad neta anual después de impuestos. Los datos de la tabla 25-21 están trazados en la figura 25-38 y en ella se muestra que el apalancamiento no tiene efecto sobre el (ROE) cuando la tasa de interés sobre el dinero tomado a préstamo es igual al rendimiento sobre el activo (ROA) antes de impuestos. El apalancamiento produce un mayor valor de (ROE) cuando (ROA) es mayor que la tasa de interés sobre el dinero tomado a préstamo y es menor cuando es más bajo.

Cuanto mayor sea la relación de deuda o apalancamiento (DR), más sensible es el (ROE) a un cambio en (ROA) y mayor será la pendiente de la línea en la figura 25-38. Los dividendos a los accionistas se pagan con la utilidad neta anual después de impuestos A_{NNP}, con la cual se calcula el (ROE) después de impuestos (Fig. 25-38). Por tanto, cuanto mayor sea el apalancamiento, mayor será el riesgo financiero para los accionistas. Este riesgo no es el mismo que el riesgo financiero para la empresa, que es función de las perspectivas generales en su industria en particular. El apalancamiento aumenta el rendimiento para los accionistas cuando (ROA) es mayor que la tasa de intereses sobre la deuda y lo reduce cuando (ROA) es menor que la tasa de intereses.

El que los activos de una compañía se financien en gran parte con su capital propio o en gran parte con la deuda, o alguna combinación de ellos, depende de un buen número de factores. Si las ventas no fluctúan, una empresa está en buena situación para pagar los cargos fijos por intereses sobre la deuda. Lo mismo ocurre si el ingreso por ventas aumenta en forma continua. En este caso, es muy posible que cualquier nueva emisión de acciones comunes de la empresa se coloque a buen precio y que también aumente el atractivo de la financiación con capital propio.

La actitud de la administración es también un factor importante para determinar cuánta financiación con deuda se utiliza. En una empresa pequeña, en la cual el consejo de administración posee la mayor parte del capital y las acciones, pueden estar muy renuentes a emitir más acciones comunes que les diluirían el control de la empresa. Si la administración tiene mucha confianza en las futuras perspectivas, deseará asegurarse el rendimiento máximo. Por contraste, el capital contable en una empresa muy grande está muy distribuido y la emisión de acciones comunes adicionales tiene poco efecto sobre el control de la empresa.

La diferencia entre financiar con capital propio o con deuda no está bien definida. Por ejemplo, las acciones preferentes se pueden clasificar como capital contable o como deuda, según quien haga el análisis financiero.

TABLA 25-22 Capital contable presentado en el balance

Acciones preferentes, valor nominal por acción $100			
Autorizadas 2000; en circulación	1 500	$ 150 000	
Menos: descuento sobre acciones preferentes		(10 000)	
Valor de acciones preferentes			$ 140 000
Acciones comunes, valor nominal por acción $10			
Autorizadas y en circulación, 100 000 acciones	$1 000 000		
Cantidad pagada en exceso del valor nominal	100 000		
		$1 100 000	
Utilidades retenidas		100 000	
Valor de acciones comunes			$1 200 00
Capital contable			$1 340 000

Financiación con capital propio En un balance típico se presentarán el capital contable o propio y se mencionarán los valores de acciones preferentes, comunes y las utilidades retenidas (Tabla 25-22).

La emisión de acciones comunes es el método básico para financiar una empresa. Los accionistas comunes son los que corren el riesgo final en un negocio porque no tienen derecho a un rendimiento o a una devolución de su inversión. Sin embargo, tienen derecho a elegir a los consejeros y funcionarios encargados de la administración de la empresa. Hay la posibilidad de que los accionistas destituyan con su voto a los consejeros si no se pagan dividendos razonables. Por lo general, la responsabilidad de los accionistas está limitada al valor nominal o a la par de sus acciones y, por tanto, sólo pueden perder lo que ya pagaron por sus acciones. Si esa responsabilidad no está limitada por las leyes, como en algunos países, están en peligro los bienes personales de los accionistas en caso de quiebra de la empresa, en proporción al número de acciones que poseen.

Cuando las leyes de un país lo permiten, a menudo se pueden utilizar las acciones preferentes como opción cuando una empresa no desea emitir acciones comunes adicionales ni incurrir en el pago de intereses para financiar la deuda. También y para evitar repeticiones innecesarias, en lo siguiente debe quedar entendido que se aplicará la legislación de cada país. Por lo general, los accionistas preferentes no suelen tener voto en la elección de consejeros. Tienen el derecho a percibir una cantidad fija de dividendos antes que los tenedores de acciones comunes. Las sociedades por acciones no tienen que pagar dividendos. El consejo de administración puede decidir el pago de un dividendo muy pequeño o ninguno en un año determinado. Los tenedores de acciones preferentes tienen derecho a recibir una compensación por el pago reducido de dividendos en años anteriores, cuando la sociedad vuelva a pagarlos.

Los accionistas comunes tienen derecho sobre los activos remanentes de una sociedad en caso de disolución o liquidación, pero sólo después de pagar a los acreedores de todo tipo y a los accionistas preferentes. Cuanto mayor sea la proporción de financiamiento con deuda en una empresa, menor será la suma que recibirán los accionistas comunes en caso de liquidación de la sociedad.

Los accionistas comunes suelen tener derecho de prioridad en la primera opción de compra de cualesquiera emisiones adicionales de acciones comunes. Esto evita que los consejeros o funcionarios aprovechen una emisión adicional para contrarrestar el control y los votos de los accionistas existentes. Este derecho de prioridad también protege a los accionistas existentes en contra de que se reduzca el valor de sus acciones con esa dilución, porque habría que distribuir la misma utilidad neta entre un mayor número de acciones.

Considérese el ejemplo muy simplificado de una empresa que tiene 100 000 acciones comunes con valor de mercado de $10, o sea, un valor total de mercado de $1 000 000. Si se emiten otras 50 000 acciones a $4 cada una, el valor total de mercado de las 150 000 acciones es de $1 200 000, o sea, $8 cada una. Esto significa que los nuevos accionistas han ganado a expensas de los originales. El derecho de prioridad tiene la finalidad de impedirlo. En la práctica, la situación es mucho más compleja que lo mencionado.

Las acciones comunes y las preferentes tienen un valor a la par o nominal. En el caso de las comunes, el valor de mercado en el momento de la emisión difiere del valor nominal. Las acciones se pueden emitir ya sea con un premio o con descuento, según sean las condiciones económicas prevalecientes y el tamaño de la empresa. La diferencia entre la cantidad real pagada y el valor nominal aparece en la sección de capital contable, en el balance de la tabla 25-22. La emisión de acciones con premio (prima) o con descuento se hace para proteger a los accionistas existentes.

En el caso de las acciones preferentes, el valor nominal tiene más importancia que en las comunes, porque es la cantidad que se adeuda a los accionistas preferentes en caso de liquidación, siempre y cuando esto se estipule en los estatutos o en las condiciones para la emisión.

La ventaja del empleo de acciones comunes para financiar activos es que no hay que pagar cargos fijos por intereses. Además, no hay fecha de vencimiento, como ocurre con todos los préstamos y con muchas emisiones de preferentes. Puede ser mucho más fácil emitir acciones comunes que financiar la deuda. Sin embargo, los costos de flotación de las acciones comunes pueden ser muy altos, en especial cuando el mercado está deprimido, con lo cual se necesitan grandes descuentos en el precio para inducir la compra.

El capital contable en una compañía consta de las aportaciones de los accionistas y el superávit generado con las utilidades retenidas. La presencia de utilidades retenidas en un balance (Tabla 25-22), no significa por necesidad que equivalgan a una cantidad igual en efectivo; en realidad, quizá haya muy poco o ningún efectivo disponible. Las utilidades retenidas presentadas en el balance pueden ser ficticias. Por ejemplo, las partidas de activo en el balance pueden tener menor valor que, cuando menos, la suma de utilidades retenidas.

Compraventa de acciones Los accionistas requieren un rendimiento razonable sobre su inversión y el precio publicado de las acciones representa el consenso de opiniones de los inversionistas respecto al valor real de la empresa. Las compras o ventas de acciones se suelen hacer por conducto de corredores o casas de bolsa.

La mayor parte de las operaciones con acciones se efectúan por medio de bolsas de valores, en donde están registradas o listadas las acciones; cada bolsa suele tener su edificio y sede en diversas ciudades. Cada bolsa tiene miembros quienes son los representantes de corredores importantes que pueden tener oficinas en varias ciudades. Estas oficinas están en contacto telefónico y por télex o cable constante con sus representantes en la bolsa, para darles instrucciones de comprar o vender determinada emisión de acciones. Dado que los corredores trabajan a base de comisión y de cargos sobre las transacciones, tratan de cumplir con esas instrucciones ya sea en forma directa o por medio de otros corredores. En Gran Bretaña, los corredores deben negociar por conducto de un intermediario independiente, similar a un corredor de valores especiales, que cotiza un precio bajo para la venta y otro más alto para la compra antes de que sepa si el corredor va a comprar o a vender. La diferencia es el margen para el intermediario. Si la demanda de compra es mayor que la oferta de venta, aumenta el precio de las acciones hasta que alguien tiene la tentación de vender. A la inversa, si hay más oferta que demanda, es posible que baje el precio.

Es ventajoso para una empresa tener sus acciones registradas en una bolsa de valores, porque sus inversionistas pueden venderlas con más facilidad si quieren hacerlo. Esta liquidez adicional hace que los inversionistas estén mejor dispuestos a aceptar una tasa de rendimiento más baja que, en realidad, disminuye el costo del capital para la empresa.

Dado que en la sección financiera de los periódicos se publican las transacciones con acciones de una empresa registrada, una que está en buena situación financiera creará más confianza para obtener financiación de otros tipos. Cuando no hay mercado de valores, esas transacciones son poco frecuentes y los precios tendrán grandes fluctuaciones: los acreedores serán más cautelosos y pueden llegar a actuaciones judiciales para defender sus intereses. Esas operaciones se conocen como "venta directa" y sólo las efectúan algunos corredores especialistas de bolsa que tienen cierta cantidad de acciones y están dispuestos a crear mercado para ellas o las limitan a transacciones entre particulares.

Utilidades retenidas Se producen muchas confusiones cuando el rubro de utilidades retenidas se divide entre otros varios, tales como reserva para reposición de la planta, reserva para contingencias, etc. Este procedimiento restringe a la administración cuando necesita tomar decisiones para los desembolsos.

La suma de utilidades retenidas presentada en el balance no se debe tomar como una medida de la cantidad de futuros dividendos que es posible pague la empresa. Puede existir un contrato social en donde se estipule un saldo mínimo de utilidades retenidas que no estarán disponibles para pagar dividendos hasta que se hayan rescatado todos los bonos (obligaciones) emitidos por la empresa.

Los dividendos se pueden pagar en efectivo o con una emisión adicional de acciones, que es, en realidad, un dividendo en acciones; ambas se utilizan para reducir el precio de las acciones, si la administración considera que es muy alto. Un dividendo en acciones es un traspaso de utilidades retenidas a la cuenta de acciones comunes y la cantidad traspasada no está disponible para futuros dividendos. Cuando una empresa tien
dividendo en accion
Financiación de
deuda abarca una se
Las formas más con
hipotecas y obligaci
Un bono es simpl
entre el acreedor y el
descripción detallad
con cláusulas para p
designa un fideicom
de bonos; suele ser
con una estipulació
en una fecha anterio
empresa cuando las
empresa tiene que p
este privilegio. Esa
A veces, en una e
catar una emisión de
les, invertidas a una
cada año del period
con valor presente

en donde f_{AP} es el fa

TABLA 25-23

	In
	Número
Hilera	Re
1	Activo circula / Deuda circula
2	Utilidad neta / Ventas net
3	Utilidad neta / Capital
4	Utilidad net / Capital de tra
5	Ventas netas / Capital
6	Ventas n / Capital de tra
7	Periodo de co
8	Ventas netas / Inventario
9	Activo fijo × / Capital
10	Deuda circula / Capi
11	Deuda total / Capital
12	Inventario / Capital de tr
13	Deuda circul / Invent
14	Deuda circul / Capital de tr

* Reproducida co
NOTA: Los númer

do una empresa tiene poco efectivo disponible, se puede utilizar un dividendo en acciones en vez de dinero.

Financiación de la deuda En la práctica, la financiación de la deuda abarca una serie de valores de renta fija, a largo y corto plazo. Las formas más comunes para la deuda a largo plazo son los bonos, hipotecas y obligaciones.

Un bono es simplemente un pagaré a largo plazo. Es un contrato entre el acreedor y el deudor, para esa emisión. El contrato incluye una descripción detallada de los bienes que se otorgan en garantía, junto con cláusulas para protección y las estipulaciones para el rescate. Se designa un fideicomisario para proteger los intereses de los tenedores de bonos; suele ser un banco comercial. Los bonos se pueden emitir con una estipulación para rescate que permita a la empresa retirarlos en una fecha anterior a la del vencimiento. Esto es una ventaja para la empresa cuando las tasas de interés están a la baja. Sin embargo, la empresa tiene que pagar una cantidad superior al valor nominal por este privilegio. Esa cantidad adicional se llama prima.

A veces, en una empresa se crea un fondo de amortización para rescatar una emisión de bonos. Una serie de aportaciones anuales A iguales, invertidas a una tasa fraccional de interés i, que se hacen al final de cada año del periodo de vigencia, es equivalente a una suma de dinero con valor presente P, expresada por

$$A = Pf_{AP} \tag{25-46}$$

en donde f_{AP} es el factor de valor presente de la anualidad, que es

$$f_{AP} = [i(1 + i)^n]/[(1 + i)^n - 1]$$

Una empresa puede utilizar un fondo de amortización en muchas formas, pero la más sencilla es aportar una cantidad fija A al final de cada año para rescatar bonos, hasta que se hayan rescatado todos los bonos al final de n años. Esta aportación anual puede ser una fuerte sangría de efectivo. Si no se efectúa el pago, los acreedores pueden entablar acciones judiciales. En el caso de bonos de intereses sobre utilidades, la empresa sólo tiene la obligación de pagar intereses si obtiene utilidades.

La hipoteca es una deuda garantizada con bienes (activos) específicos del deudor. La primera hipoteca tiene preferencia sobre todos los bienes. Una segunda hipoteca, por lo general, es sobre el valor residual de los bienes. Una hipoteca general está garantizada por todos los bienes y activos propiedad de la empresa (deudor).

Una obligación es un bono sin garantía prendaria. Las empresas grandes y en buena situación financiera tienen más facilidad para emitir estas obligaciones que las empresas pequeñas, pues éstas tendrían que garantizarlas con sus bienes. Los obligacionistas son, en realidad, acreedores generales. Los tenedores de obligaciones subordinales tienen derecho a los activos sólo después de liquidar a otros acreedores. La emisión de obligaciones subordinadas tiene ventajas en materia de impuestos para una empresa en comparación con la emisión de acciones preferentes, porque los intereses que se pagan son deducibles de impuestos.

TABLA 25-23 Relaciones comparativas para grupos seleccionados de industrias en Estados Unidos en 1979*

Hilera	Industria / Relación	Productos químicos agrícolas	Productos químicos, álcalis y cloro	Pinturas y productos afines	Refinación de petróleo	Materiales y resinas plásticos	Jabón y otros detergentes
	Número de empresas	43	5	196	45	91	56
1	Activo circulante / Deuda circulante, relación	1.47 (1.01 2.43)	2.62 (1.05 9.91)	2.40 (1.64 3.76)	1.43 (1.10 2.18)	2.07 (1.47 2.90)	2.71 (1.97 5.42)
2	Utilidad neta × 100 / Ventas netas, %	1.45 (.54 3.76)	2.55 (1.90 3.21)	3.90 (2.10 6.64)	2.12 (1.54 3.43)	4.44 (1.91 7.63)	3.37 (2.61 6.47)
3	Utilidad neta × 100 / Capital, %	10.91 (2.05 27.05)	14.76 (10.43 19.09)	20.43 (9.73 35.29)	15.88 (10.54 41.00)	16.78 (11.33 26.17)	17.91 (12.41 34.16)
4	Utilidad neta × 100 / Capital de trabajo neto, %	6.92 (3.64 58.31)	54.09 (11.68 96.50)	22.76 (12.05 41.46)	43.06 (14.89 69.31)	27.48 (14.06 45.18)	23.27 (13.10 42.48)
5	Ventas netas / Capital, relación	4.61 (2.10 8.51)	3.64 (2.10 7.03)	4.63 (3.44 7.17)	6.31 (3.54 10.87)	4.43 (2.78 7.86)	4.48 (3.32 6.97)
6	Ventas netas / Capital de trabajo neto, relación	5.10 (3.17 12.91)	3.66 (2.66 27.20)	5.59 (4.21 8.98)	16.91 (4.77 21.60)	7.00 (3.58 10.93)	6.29 (4.28 8.28)
7	Periodo de cobranza, días	49 (27 91)	58 (45 63)	40 (26 53)	33 (15 51)	48 (36 60)	33 (22 51)
8	Ventas netas / Inventario, relación	7.3 (3.8 16.5)	16.1 (8.2 42.7)	8.3 (6.2 13.00)	18.4 (8.7 34.8)	10.6 (8.1 18.4)	8.9 (7.7 13.1)
9	Activo fijo × 100 / Capital, %	74.1 (26.7 98.5)	58.0 (25.7 79.2)	36.1 (19.6 55.00)	91.1 (48.2 147.5)	50.6 (26.8 116.0)	30.5 (19.2 56.4)
10	Deuda circulante × 100 / Capital, %	90.2 (39.2 161.0)	40.8 (15.4 108.1)	55.1 (28.1 98.7)	101.6 (45.6 187.2)	54.3 (27.8 119.2)	46.8 (22.2 79.4)
11	Deuda total × 100 / Capital, %	104.8 (46.7 224.1)	84.7 (24.2 148.0)	79.6 (38.3 150.2)	137.8 (75.1 335.6)	89.5 (37.8 194.5)	55.6 (26.5 111.2)
12	Inventario × 100 / Capital de trabajo neto	81.1 (30.5 139.4)	17.8 (4992.6 75.0)	69.6 (45.4 91.3)	57.5 (14.2 104.0)	53.0 (23.4 81.7)	58.9 (42.9 88.9)
13	Deuda circulante × 100 / Inventario, %	140.4 (78.3 311.8)	137.8 (67.3 806.5)	94.9 (56.9 154.5)	240.8 (156.4 503.0)	154.3 (97.5 277.9)	96.5 (41.7 144.0)
14	Deuda circulante × 100 / Capital de trabajo neto, %	44.7 (48.6 95.6)	32.3 (4991.9 63.5)	40.6 (16.8 66.7)	75.5 (24.1 168.7)	37.4 (9.9 102.0)	25.4 (14.4 64.8)

* Reproducida con permiso especial de *Dun's Review*, octubre, 1979. D.R.© 1979, Dun & Bradstreet Publications Corporation.

NOTA: Los números entre paréntesis son valores de los cuartiles inferior y superior respectivamente. Los números que están encima son el valor de la mediana.

TABLA 25-24 Balance de manufactureros de productos químicos inorgánicos en Estados Unidos, 1972*

Activo	%	Pasivo y capital	%
Efectivo	4.3	Deuda a corto plazo con bancos	5.6
Valores negociables	2.2	Cuentas por pagar	14.5
Cuentas por cobrar, neto	26.2	Impuesto sobre la renta	3.1
Inventario, neto	24.6	Vencimientos corrientes de la deuda a largo plazo	2.1
Otros activos circulantes	0.9	Otros pasivos circulantes	5.0
Total de activo circulante	58.3	Total de deuda circulante	30.3
Activo fijo	36.3		
Otros activos no circulantes	5.4	Deuda a largo plazo no subordinada	18.3
		Total de deuda no subordinada	48.6
		Deuda subordinada	3.1
		Capital contable	48.3
Total del activo	100.0	Total pasivo y capital	100.0

* Condensada de *Annual Statement Studies*, ed. 1973, D.R. © 1973 por Robert Morris Associates, Philadelphia. Las cifras para cada industria en ese estudio no son representativas de toda esa industria y no se deben considerar como normas.

Un analista financiero que estudie una empresa desde el punto de vista de un posible comprador de acciones comunes, es posible que clasifique las acciones preferentes como deuda. Por contraste, los tenedores de bonos y acreedores generales las pueden considerar como capital contable adicional. Ya que las acciones preferentes son un tipo de valores híbridos, las puede emitir una empresa cuando la administración está indecisa en utilizar el capital o la deuda para financiar activos adicionales. Sin embargo, las acciones preferentes tienen la desventaja de que los dividendos no se pueden deducir de impuestos.

Datos comparativos de empresas En la tabla 25-23 aparecen datos comparativos de empresas, compilados por Dun & Bradstreet para diversos tipos de industrias de proceso. Se da el valor de la mediana para cada relación o razón, junto con los valores de los cuartiles inferiores y superiores entre paréntesis.

La hilera 1 en la tabla 25-23 es la

$$\text{Relación de circulantes} = \frac{\text{activo circulante}}{\text{pasivo circulante}} \qquad (25\text{-}142)$$

Compárese con

$$\text{Relación rápida} = \frac{\text{activo líquido}}{\text{pasivo circulante}} \qquad (25\text{-}143)$$

La hilera 2 en la tabla 25-23 es el margen de utilidad (PM) según la ecuación (25-127). En este caso la utilidad neta es A_{NNP}, después de la depreciación y los impuestos. Las ventas netas anuales A_S son después de deducir rendimientos, bonificaciones y descuentos sobre las ventas brutas.

La hilera 3 en la tabla 25-23 es el rendimiento sobre el capital (ROE) según la ecuación (25-130). En este caso, el capital contable es el tangible y representa la suma de los valores de acciones preferentes y comunes, el superávit y las utilidades no distribuidas o retenidas, menos cualesquiera partidas intangibles como el crédito comercial (*goodwill*).

La hilera 7 en la tabla 25-23 es el

Periodo promedio para cobranza

$$= \frac{\text{valor promedio de cuentas por cobrar}}{\text{ingreso por ventas diarias}} \qquad (25\text{-}144)$$

El pasivo consolidado (hilera 14) consiste en hipotecas, bonos, obligaciones, pagarés con vencimiento escalonado u otras obligaciones con vencimiento a más de un año de la fecha del balance.

Robert Morris Associates también compila amplios datos comparativos de empresas para diversas industrias. Además de las relaciones similares a las de Dun & Bradstreet (Tabla 25-23), Robert Morris Associates también presenta desgloses muy útiles de activos y pasivos para diversas industrias. En la tabla 25-24 se presenta un desglose de activos y pasivos de fabricantes de productos químicos inorgánicos en Estados Unidos en 1972.

Aplicación de las relaciones globales de empresas En la tabla 25-25 se presentan las diversas relaciones de una empresa hipotética. El balance de la tabla 25-26 se ha preparado con las relaciones de la tabla 25-25, términos de los ingresos por ventas netas anuales A_S.

Calcúlense los siguientes valores para el lado derecho del balance como sigue:

Según la relación 5:

$$\text{Capital contable} = A_S/2.50 = 0.4A_S$$

Según la relación 11:

$$\text{Deuda total} = (0.4A_S)(0.65) = 0.26A_S$$

Según la relación 10:

$$\text{Deuda circulante} = (0.4A_S)(0.35) = 0.14A_S$$
$$\text{Deuda a largo plazo} = \text{deuda total} - \text{deuda circulante}$$
$$\text{Deuda a largo plazo} = 0.26A_S - 0.14A_S = 0.12A_S$$

Calcúlense los siguientes valores para el lado izquierdo del balance:

Según la relación 9:

$$\text{Activo fijo} = (0.4A_S)(0.74) = 0.296A_S$$

Según la relación 1:

$$\text{Activo circulante} = (0.14A_S)(2.60) = 0.364A_S$$

Según la relación 8:

$$\text{Inventario} = A_S/7.14 = 0.14A_S$$

Según la relación 7:

$$\text{Cuentas por cobrar} = (A_S/365)(61) = 0.167A_S$$

Efectivo e inversiones a corto plazo = total activo circulante − (inventario + cuentas por cobrar)

Efectivo e inversiones a corto plazo

$$= 0.364A_S - 0.307A_S = 0.057A_S$$

Además de los datos para el balance, hay que calcular la utilidad neta anual después de pagar impuestos, es decir, que según la relación 2 debe ser $A_{NNP} = 0.04A_S$.

En la práctica, las relaciones se obtienen con los datos del balance. La ventaja de esa presentación es que relaciona todo con los ingresos por ventas netas anuales y, por tanto, subraya la importancia de las ventas.

El estudio cuidadoso de las relaciones puede permitir muchas inferencias de la situación de la empresa. Por ejemplo, la relación de apalancamiento o deuda (DR) en este caso es:

TABLA 25-25 Relaciones para una empresa típica de productos químicos industriales

No.	Relación
1	$\dfrac{\text{Activo circulante}}{\text{Deuda circulante}} = 2.60$
2	$\left(\dfrac{\text{Utilidad neta}}{\text{Ventas netas}}\right)100 = 4.00$
3	$\left(\dfrac{\text{Utilidad neta}}{\text{Capital}}\right)100 = 10.0$
4	$\left(\dfrac{\text{Utilidad neta}}{\text{Capital de trabajo neto}}\right)100 = 18.18$
5	$\dfrac{\text{Ventas netas}}{\text{Capital}} = 2.50$
6	$\dfrac{\text{Ventas netas}}{\text{Capital de trabajo neto}} = 4.50$
7	$\text{Periodo de cobranza} = \dfrac{\text{cuentas por cobrar}}{\text{ventas por día}} = 61 \text{ días}$
8	$\dfrac{\text{Ventas netas}}{\text{Inventario}} = 7.14$
9	$\left(\dfrac{\text{Activo fijo}}{\text{Capital}}\right)100 = 74.00$
10	$\left(\dfrac{\text{Deuda circulante}}{\text{Capital}}\right)100 = 35.00$
11	$\left(\dfrac{\text{Deuda total}}{\text{Capital}}\right)100 = 65.00$
12	$\left(\dfrac{\text{Inventario}}{\text{Capital de trabajo neto}}\right)100 = 63.00$
13	$\left(\dfrac{\text{Deuda circulante}}{\text{Inventario}}\right)100 = 100.00$
14	$\left(\dfrac{\text{Deuda consolidada}}{\text{Capital de trabajo neto}}\right)100 = 76.50$

$$(\text{DR}) = \frac{\text{deuda total}}{\text{activo total}} = \frac{0.260A_S}{0.660A_S} = 0.40$$

Este valor es muy bajo y no presenta ningún problema de control por los deudores, como los que pueden surgir cuando (DR) es mayor que 1.

Con la tabla 25-26 se calcula la relación de:

$$\frac{\text{Deuda circulante}}{\text{Efectivo + inversiones a corto plazo}} = \frac{0.140A_S}{0.057A_S} = 2.45$$

Por tanto, si más del 40% de los acreedores solicitan un pago anticipado, será posible hacerlo. Por ello no es posible que surjan problemas de liquidez y se puede aprovechar el descuento por pronto pago o pago anticipado. Además, la deuda circulante se podría cubrir con la venta del inventario, que requiere $(0.140A_S/A_S)(365) = 51$ días. La relación rápida es de $1/2.45 = 0.407$

Si se supone que la deuda circulante se debe pagar dentro de 61 días, o sea el mismo tiempo concedido por los acreedores, no es fácil que se entablen acciones judiciales.

La utilidad de 10%, indicada con la relación 3 en la tabla 25-25, se reducirá con cualesquiera dividendos por pagar a los accionistas preferentes, porque ese pago no es parte de los gastos por la deuda fija; entonces el remanente se divide entre los accionistas comunes. Si todas las deudas a largo plazo fueran en acciones preferentes rescatables al 6%, entonces, de acuerdo con la relación 3, la utilidad anual neta, después de impuestos, es $A_{NNP} = 0.10(0.40A_S)$ o $0.04A_S$. Los intereses por pagar sobre las acciones preferentes es $0.06(0.12A_S)$ o sea $0.0072A_S$. Entonces, las ganancias para las acciones comunes son:

$$(0.04A_S - 0.0072A_S)/(0.4A_S - 0.12A_S) = 0.1171$$

Este valor corresponde a 11.71 centavos por dólar del valor de acciones comunes.

Si se supone que las tasas vigentes de interés ofrecidas por los bancos, gobierno, etc., para inversión de capital sin riesgo son de 10%, entonces el precio máximo de mercado económico de acciones de \$100 en esta empresa hipotética es alrededor de \$117. Si toda la deuda está documentada, las ganancias sobre las acciones comunes serían de 10 centavos por dólar de capital neto y el precio máximo de marco económico de las acciones sería alrededor de \$100, salvo que se esperase un aumento en los precios de las acciones.

Es fácil determinar otras relaciones con las incluidas en la tabla. Por ejemplo, el rendimiento sobre el activo (ROA) y la relación de rotación de activo (ATR) son:

$$(\text{ROA}) = \frac{\text{utilidad neta anual}}{\text{activo total}}100 = \frac{0.04A_S}{0.66A_S} = 6.06$$

$$(\text{ATR}) = \frac{\text{ingresos por ventas anuales}}{\text{activo total}}100$$

$$(\text{ATR}) = (A_S/0.66A_S)100 = 151.5$$

El cuartil inferior, la mediana y el cuartil superior que aparecen en la tabla 25-23 son aquellos para los que las probabilidades acumuladas de lograr esos valores son 25, 50 y 75%. Ya que esas curvas se vuelven asintónicas con infinito positivo o negativo con cero y 100% de probabilidad, las curvas de probabilidad para cada relación se pueden trazar con los métodos ya descritos.

Costo del capital El valor de la tasa de interés de rendimiento utilizado para calcular el valor presente neto (NPV) de un proyecto se suele denominar costo del capital. No es un valor constante porque depende de la estructura financiera de la empresa, de su política para un proyecto particular, las leyes fiscales locales y, en algunos casos, la medición del riesgo relacionado con el proyecto. Este último factor se maneja con más facilidad con el cálculo del riesgo permitido para la

TABLA 25-26 Balance de una empresa típica de productos químicos industriales al 31 de diciembre de 198X

Activo		Pasivo y capital	
Activo circulante		Pasivo	
Efectivo	$0.057A_S$	Deuda circulante	$0.140A_S$
Cuentas por cobrar	$0.167A_S$	Deuda a largo plazo	$0.120A_S$
Inventario	$0.140A_S$		
Total activo circulante	$0.364A_S$	Deuda total	$0.260A_S$
Activo fijo	$0.296A_S$	Capital	$0.400A_S$
Total del activo	$0.660A_S$	Total pasivo y capital	$0.660A_S$

empresa inherente en el proyecto, i_r', de la ecuación (25-108) escrita en la forma de:

$$i_r' = [1 + (\text{DCFRR})]/(1 + i) - 1$$

en donde i es el costo del capital con exclusión de la tolerancia o riesgo permitido. El valor de i_r' se debe comparar con la probabilidad de alcanzar o no un (NPV) de cero cuando se utiliza ese valor de i. Entonces, la decisión de seguir adelante se puede tomar con pleno conocimiento de las posibilidades de no tener éxito. La decisión se puede relacionar con la actitud de la empresa hacia presupuestos del tamaño en cuestión con el empleo de las utilidades probables descritas. Por supuesto los flujos de efectivo utilizados para calcular (NPV) y (DCFRR) se deben corregir de acuerdo con las tasas previstas de inflación, de preferencia en la fecha en que se obtuvo la curva de utilidad. Esto es importante porque la inflación puede producir un efecto deformante en las curvas de utilidad obtenidas en distintas fechas. Esto quizá se deba a un deseo inconsciente de protegerse contra la inflación con el logro de mayores recompensas, a la vez que se da menor importancia a cualesquiera pérdidas sufridas, lo cual es una actitud de juego de azar.

Si no se tiene una tolerancia para riesgo, el costo del capital se convierte en un cálculo financiero técnico, basado en las fuentes de fondos y la política de la empresa. Por ello, por lo general se presentará como una cifra especificada para utilizarla en un avalúo en particular y, entonces, no debe preocupar al calculista del proyecto. Sin embargo, en el siguiente resumen se indican los factores a considerar.

En la mayor parte de las empresas, el objetivo de la política de la empresa es maximizar al rendimiento financiero para los accionistas. Esto no ocurre siempre, pues una empresa con pocos años de existencia, reinvertirá por lo general, una proporción muy grande de sus utilidades para estimular su crecimiento. Además, cada vez se inician más proyectos para restaurar y preservar el ambiente o para crear empleos en una población determinada. En estas circunstancias, se asignaría al proyecto un valor bajo del costo del capital. En muchos proyectos gubernamentales se acepta una pérdida limitada, en cuyo caso el valor de i sería negativo.

Cuando el objetivo es maximizar el rendimiento, después de impuestos, para los accionistas, hay que llegar a un equilibrio entre la proporción de utilidades de la empresa después de impuestos que se retienen para permitir el crecimiento de sus activos y la proporción que se distribuye a los accionistas en forma de dividendos; éstos suelen estar sujetos al pago de impuesto personal sobre ingresos, a veces, con tasas superiores a las normales. El potencial para crecimiento se debe reflejar en un valor creciente en la cotización de las acciones en el mercado (en su caso). Este crecimiento puede dar por resultado tener que pagar impuestos sobre ganancias de capital o por herencias. La selección de la proporción adecuada de utilidades que se va a retener es de suma importancia, porque influye en el atractivo de la empresa para los inversionistas, y además, en su buen crédito a los ojos de los acreedores. La división óptima tiene la influencia del tipo de inversionista, porque las tasas de impuestos y deducciones para las empresas difieren a menudo de las aplicables a las personas físicas. Por esta razón, la división óptima resentirá los efectos fiscales locales.

Muchas empresas pueden mantener un volumen determinado de operaciones sólo con reinversiones continuas en planta y equipo. Si se requiere crecimiento de la empresa, es esencial una inversión adicional. En general, una empresa sólo tiene tres fuentes de dinero "fresco": efectivo proveniente de la venta de una nueva emisión de acciones, utilidades retenidas y capital de deuda de todas clases, incluso impuestos diferidos. En ciertas circunstancias, se pueden obtener aportaciones de efectivo de fuentes gubernamentales. Cada una de estas fuentes tiene su propia tasa real de interés, que es el promedio ponderado de las tasas que constituyen el costo del capital con exclusión de la tolerancia o asignación para el riesgo.

No se pagan intereses directamente sobre el capital de las acciones, pero los inversionistas esperan cierta tasa oculta. Si no hay la expectativa de cierto rendimiento por sus acciones, no invertirían en una nueva emisión ni tampoco conservarían las acciones compradas. La venta de acciones en la bolsa no influye en el efectivo que tiene la empresa, pero las nuevas emisiones deben ser a precios más bajos que los cotizados en la bolsa, salvo que se tenga gran confianza de que el nuevo dinero producirá un ingreso muy superior a la reducción en las utilidades por acción ocasionadas por la nueva emisión. En las emisiones de acciones que devengarán una tasa fija de intereses, éstos se manejan por lo general como gastos deducibles de impuestos, en la misma forma que los pagaderos en un crédito bancario a corto plazo. Los impuestos diferidos pagarán una tasa de interés que, igual que un préstamo bancario a corto plazo, es compuesto diariamente a una tasa anual nominal, pero no suelen ser un gasto deducible para fines de impuestos. Las cuentas por pagar suelen devengar una tasa simbólica de intereses, pues si se cubren en determinado plazo se logrará un descuento por pronto pago.

Ejemplo 18 Una empresa requiere una inversión de \$100 000 en nuevas instalaciones para mantener sus ventas actuales. Determínese el costo corriente o actual del capital para la empresa y el costo del capital libre de riesgo que se deben asignar al proyecto de ampliación de la planta, con los siguientes datos:

Activo por venta de acciones:	\$ 300 000
por utilidades retenidas	200 000
como cuentas por pagar	100 000
como impuestos diferidos	200 000
como crédito bancario	200 000
Activo total	\$1 000 000
Ingresos netos actuales	\$ 200 000

Las cuentas por pagar son netas al día último del mes, con un 2% de descuento por pronto pago. Los intereses sobre el crédito bancario y los impuestos diferidos son compuestos diariamente a tasas nominales anuales de 15 y 9%, respectivamente. Los impuestos directos, sobre utilidades distribuibles y a las personas físicas son de 50, 40 y 30%. La tasa actual de inflación es de 8% anual. El rendimiento tradicional que esperan los inversionistas es de 7% anual, libre de todo impuesto en términos reales.

La tasa de interés equivalente a los descuentos por pronto pago es de 2% mensual, porque este descuento se lograría todos los meses si se hicieran los pagos al principio del mes en vez de, como se acostumbra, en los últimos días. Como las cuentas por pagar se liquidan cada mes, el interés simbólico se paga todos los meses y no será compuesto. Este descuento equivale a 12 pagos mensuales a interés simple, cada año. Entonces, de acuerdo con la ecuación (25-31), la tasa real de interés anual sobre los descuentos = (12)(0.02) = 0.24 = 24%. Por tanto, un buen empleo del efectivo sobrante sería para reducir esta deuda lo más pronto posible. Esto requeriría efectivo equivalente a 1/6 parte de las cuentas por pagar cada año, o sean, \$16 700. Entonces, se puede suponer que este nivel de liquidez no está disponible para los proyectos de capital, excepto como capital de trabajo para reducir la deuda o para proyectos con capital fijo. Además, como el nuevo proyecto no aumentará las ventas, no puede generar deuda adicional de esta clase. Por tanto, no está disponible esa fuente como capital para el nuevo proyecto.

Ya que el crédito bancario a corto plazo (llamado también sobregiro autorizado o crédito simple en cuenta corriente) devenga intereses todos los días a una tasa nominal de 15% anual, se verá por la ecuación (25-38) que la tasa anual real de intereses sobre el mismo es $= (1 + 0.15/365)^{365} - 1 = 16.18\%$. En forma similar, la tasa real de interés anual sobre los impuestos diferidos es $= (1 + 0.09/365)^{365} - 1 = 9.42\%$ anual.

La nueva planta no aumentará las ventas ni los impuestos, por lo cual esta fuente no está disponible como capital para el proyecto. Se podría disponer de un aumento en el crédito bancario, con sujeción a un máximo impuesto por la capacidad aceptable de la empresa.

Ya que la liquidez de la empresa es tan baja, es posible que ya haya llegado a su máxima capacidad de deuda, en cuyo caso la relación sería:

$$\frac{\text{Capital total}}{\text{Deuda total}} = \frac{\$300\,000 + \$200\,000}{\$100\,000 + \$200\,000 + \$200\,000} = 1.00$$

Ya que no se dispone ni del aumento en cuentas por pagar ni de un mayor adeudo de impuestos para financiar el nuevo proyecto, esto implica que los \$100 000 requeridos de nuevo capital estarían disponibles en forma de \$50 000 por un aumento en el crédito bancario y de \$50 000 por el aumento de capital contable. Por tanto, hay que calcular la tasa real de intereses sobre el capital en cuestión.

El capital contable está disponible en dos fuentes. Primera, la empresa puede vender nuevas acciones que, si son comunes, no devengan intereses. Aunque esta actitud parece ser la menos costosa, no suele ser aconsejable emplearla para proyectos que no aumentan las utilidades hasta, cuando menos, un valor de compensación. Con ello, sólo quedan las utilidades retenidas como la fuente más viable de capital para el proyecto.

Los accionistas requieren un rendimiento real sobre su inversión, que supone será sobre el precio de mercado si éste es diferente al valor nominal, de 7% libre de impuestos. Las utilidades retenidas pagan un 40% de impuesto; por tanto, la tasa real de interés requerida sobre la distribución que no se efectuó es de 7/(1 – 0.40) = 11.67%. Esto es en términos reales y en épocas de 8% de inflación se debe aumentar, en términos de efectivo, a (1 + 0.1167)(1.08) – 1 = 20.60%.

En la misma forma, la tasa real de interés sobre las utilidades distribuidas, que pagan 30% de impuesto, se puede calcular que es de [0.07/(1 – 0.30) + 1](1.08) – 1 = 18.80%. Si las acciones tienen su valor a la par en la bolsa, esto requeriría una distribución, sobre los $300 000 emitidos, de ($300 000)(0.188) = $56 400. Se requiere esta cantidad después de haber pagado el impuesto sobre las utilidades de $200 000. Por tanto, las utilidades que se pueden retener son ($200 000)(1 – 0.50) – $56 400 = $43 600, o sea, cerca de los $50 000 requeridos. Si la empresa tiene buena reputación en el mercado de valores, una ligera reducción en los dividendos distribuidos no reducirá el precio de sus acciones, porque la finalidad es mantener las futuras utilidades. Sin embargo, sería posible que sus acciones se redujeran en ($56 400 – $50 000)/$56 400 = 0.1135 = 11.35%. Si llega a ocurrir así, la tasa real de interés sobre las utilidades retenidas se debería aumentar a 20.60/(1 – 0.1135) = 23.24%. Estas tasas están libres del impuesto a las empresas, que es la forma correcta de utilizarlas para calcular el (NPV).

La tasa de interés a pagar sobre los impuestos diferidos también está libre del impuesto a las empresas y es de 9.42%. Los intereses sobre el crédito bancario son deducibles de impuestos, por lo cual la tasa real después de impuestos se reduce a (16.18)(1 – 0.50) = 8.09%. En forma similar, ya que la ventaja no aprovechada sobre los descuentos tendería a aumentar las utilidades y, por tanto, los impuestos de la empresa, la ganancia real después de impuestos se reduce a (24)(1 – 0.50) = 12.00%.

El costo presente del capital para la empresa es el promedio ponderado de intereses pagaderos a las diversas fuentes de fondos, sobre la base de después del pago de impuestos de la empresa. Se puede calcular con facilidad que es, cuando menos, de [($300 000)(0.00) + ($200 000)(20.60) + ($100 000)(12.00) + ($200 000)(9.42) + ($200 000)(8.09)]/($1 000 000) = 8.82%. El costo del capital para el nuevo proyecto, con sólo dos fuentes de efectivo, debe ser de [($50 000)(20.60) + ($50 000)(8.09)]/($100 000) = 14.35%.

Debido a que el proyecto es esencial si se quiere mantener la producción actual, muchas empresas calcularían el costo del capital en un punto cercano al valor más bajo. Se deben esperar valores de costo de capital de alrededor de 10% en los países industrializados de la actualidad.

Se mencionó en particular que la inflación no altera la tasa de interés citada cuando se calculan los valores presentes de costo del capital. Sin embargo, hay que tenerla en cuenta al determinar la tasa de interés sobre los dividendos que esperan los accionistas.

Como se dijo, hay la posibilidad alterna de asignar al costo del capital el mejor rendimiento libre de riesgo disponible para el dinero. Después, la evaluación se efectúa como se describió en relación con la ecuación (25-108).

Administración y contabilidad de costos En cualquier periodo determinado, los costos se pueden dividir en devengados y no devengados. Un costo devengado es un gasto; un costo no devengado es una partida de activo. Esta división es la base para los estados de pérdidas y ganancias y los balances.

Se denomina contabilidad de costos a la contabilización de los costos de manufactura. Ese costo de un producto se considera, por tradición, como la suma de los costos de **1**) materiales directos, **2**) mano de obra directa, **3**) gastos indirectos de manufactura y **4**) gastos de administración, venta y financiamiento.

Se utilizan dos métodos generales en la contabilidad de costos de manufactura: costeo por absorción y costeo marginal. En el costeo por absorción, que es el más común, se incluyen todos los costos indirectos de manufactura en el costo de ventas. En el costeo marginal, sólo se incluyen los costos indirectos variables de manufactura en el costo de ventas. El costeo marginal es más útil que el de absorción para la toma de decisiones. Sin embargo, a veces es muy difícil segregar los costos, en particular los indirectos de manufactura, en componentes fijos y variables. A la larga, prácticamente todos los costos son variables. La diferencia entre los dos métodos supone que se dé gran importancia a la valuación de inventarios. En la contabilidad de costos, éstos se dividen por centros de costo. Son recursos contables que quizá no tengan existencia física. En el caso más sencillo, que es una planta que manufactura un solo producto, toda ella puede ser el centro de costo.

En la práctica, se emplean dos clasificaciones mayores en los sistemas de contabilidad de costos: costeo por orden de trabajo y costeo por proceso. En el primero se determinan los costos de cada orden de trabajo o lote, sin tener en cuenta el periodo contable. Este sistema se suele utilizar en el trabajo de construcción. El costeo por proceso se aplica para los procesos continuos y semicontinuos. Los costos se registran por periodos contables específicos.

Asignación de gastos indirectos La forma en que se asignen o prorrateen los gastos indirectos puede alterar el costo total de un producto y, por ende, los futuros flujos estimados de efectivo para un proyecto. Ya que estos flujos de efectivo se utilizan en los métodos de valor presente neto (NPV) y de tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) para calcular la rentabilidad, una asignación errónea puede hacer que se seleccione un proyecto inadecuado.

La tendencia actual es que los costos o gastos indirectos sean una proporción creciente de los costos totales del producto, debido a la complejidad cada vez mayor de las plantas de proceso. Por ello, es deseable que los ingenieros químicos tengan cierto grado de autoridad en la asignación de los costos indirectos, en vez de que sólo la hagan los contadores.

Los costos directos son los que se cargan en forma directa a un solo producto. El más común es el de la materia prima, cuyo consumo es directamente proporcional a la cantidad de producto manufacturado. El costo de la mano de obra directa para el proceso también se considera como directo.

Sin embargo, hay muchos costos que no se pueden cargar en forma directa a un producto determinado. Se denominan indirectos o fijos y abarcan desde el alumbrado y calefacción para la planta y oficinas, hasta la cafetería y el servicio médico. Cuando se manufacturan varios productos, se vuelve cada vez más difícil la asignación correcta de costos indirectos entre los diversos productos.

Se utilizan muchos métodos para calcular la cantidad de gastos indirectos que se cargan a un producto determinado, y son necesarios debido a que los costos de contabilidad se hacen prohibitivos para poder hacer el cargo de todos los costos directamente a un producto. Desafortunadamente, siempre existe un elemento arbitrario inherente al proceso de asignación.

Los costos indirectos en las industrias de procesos químicos se suelen calcular como porcentaje de **1**) costo de materiales directos, **2**) costo de mano de obra directa o **3**) costos primos, llamados a veces costos directos. Otros métodos para asignar los costos indirectos son sobre la base de **1**) superficie ocupada por el proceso, **2**) número de trabajadores, **3**) valor del capital y **4**) energía eléctrica.

TABLA 25-27 Utilidades de los productos con diferentes métodos de asignación de costos indirectos

	Producto A: base para asignación de indirectos			Producto B: Base para asignación de indirectos		
	31.25% del costo de materiales directos, $/unidad	125% del costo de mano de obra directa, $/unidad	25% del costo primo, $/unidad	31.25% del costo de materiales directos, $/unidad	125% del costo de mano de obra directa, $/unidad	25% del costo primo, $/unidad
Costo de materiales directos	8.00	8.00	8.00	6.000	6.000	6.000
Costo de mano de obra directa	2.00	2.00	2.00	4.000	4.000	4.000
Costo primo o directo	10.00	10.00	10.00	10.000	10.000	10.000
Costo indirecto	2.50	2.50	2.50	1.875	5.000	2.500
Costo total	12.50	12.50	12.50	11.875	15.000	12.500
Precio de venta	14.00	14.00	14.00	14.000	14.000	14.000
Utilidad (pérdida)	1.50	1.50	1.50	2.125	(1.000)	1.500

No se han mencionado todos los métodos que se emplean. La validez de determinado método depende del proceso y de la industria; si es inadecuado, puede dar resultados engañosos e incluso absurdos.

Considérese la manufactura de ornamentos metálicos. El costo del procesamiento, sin incluir el material, puede variar muy poco para una amplia gama de metales. Sin embargo, el costo de los materiales directos será mucho más elevado si se emplean metales preciosos en vez de metales comunes. En este caso, la asignación de costos indirectos sobre la base del costo del material directo podría dar resultados incorrectos, mientras que si está basada en el costo de mano de obra directa puede resultar muy exacta.

También puede haber problemas cuando se asignan los costos indirectos sobre la base del costo de mano de obra directa. Considérese una empresa que calcula que los costos indirectos son el 125% de los de mano de obra directa. En una planta de proceso tienen siete operarios, cada uno con un costo directo de $10 000 por periodo presupuestario. Como resultado de un estudio de tiempos y movimientos, se encuentra que la planta puede trabajar en forma satisfactoria con seis operarios. Es posible que el ahorro real en costos esté más cerca del ahorro de $10 000 en mano de obra directa por periodo, que del ahorro calculado de $10 000 + $10 000(125/100) = $22 500 por periodo. Ese ahorro calculado de $22 500 es el costo de la mano de obra directa más 125% de gastos indirectos sobre ese mismo costo.

Se debe hacer un análisis minucioso antes de detener la producción de un artículo que pierde dinero. Aunque se puedan ahorrar los costos directos del producto descontinuado, no se eliminan los costos indirectos, como se podría suponer si se calculan como porcentaje de los costos de materiales directos y mano de obra directa o costos primos. La planta sigue en su lugar junto con sus costos por intereses, seguros, pintura, mantenimiento, etc. Si se continúa la producción, todavía puede hacer una aportación útil a los gastos indirectos. Esa aportación se pierde si se detiene la producción y hay que cargar esos gastos a otros productos.

Todos los métodos utilizados para la asignación de costos indirectos pueden ocasionar problemas. Dos plantas de proceso pueden ocupar una superficie similar y tener costos de materiales y mano de obra muy diferentes. También pueden surgir problemas en una planta en que se manufacturan distintos productos, como se describe en el ejemplo 19.

Ejemplo 19 Considérese una planta que puede fabricar el producto A o el producto B. Se sabe que, a la capacidad normal, el costo indirecto es de $2.50 por unidad. El producto A tiene un costo de materiales directos de $8 y un costo de mano de obra directa de $2 por unidad. Para mayor sencillez, se considera que el costo primo es la suma de esos dos costos, es decir, $10 por unidad.

Como se indica en la tabla 25-27, el costo indirecto correcto de $2.50 por unidad, a la capacidad normal, se calcula con el empleo de, ya sea el 31.25% del costo de materiales directos, el 125% del costo de mano de obra directa o el 25% del costo primo. Todos estos métodos arrojan un costo total de $12.50 por unidad y una utilidad de $1.50 por unidad que se vende a $14.

El producto B tiene un costo de materiales directos de $6 y de mano de obra directa de $4 por unidad. Como se indica en la tabla 25-27, el costo indirecto de $1.875, $5 y $2.50 por unidad, se calcula con el empleo del 31.25% del costo de materiales directos, el 125% del costo de mano de obra directa o el 25% del costo primo. Los costos totales son $11.875, $15 y $12.50 por unidad y las utilidades son de $2.125, de −$1 y de $1.50 por unidad que se vende a $14.

Una opción para asignar los costos indirectos con un solo método es clasificarlos por grupos y hacer la asignación correcta de cada grupo. Por ejemplo, la depreciación se asignaría sobre la base del costo del capital, mientras que la mano de obra indirecta se puede asignar sobre la base del costo de la mano de obra directa o del número de empleados. Desde luego, este método alterno es más complejo, aumenta los costos del departamento de contabilidad y se presta a malas interpretaciones y a posibles abusos.

Valuación y control de inventario

Efecto del inventario sobre los ingresos en efectivo y las utilidades Cuando el volumen anual de producción es igual al de ventas anuales, los ingresos por ventas anuales, A_S, son:

$$A_S = Rc_S \qquad (25\text{-}87)$$

en donde R es el volumen de producción en unidades por año y c_S es el precio de venta por unidad. En este caso, los ingresos anuales en efectivo, A_{CI}, y la utilidad neta anual antes de impuestos A_{NP}, se expresan con las ecuaciones (25-1), (25-8) y (25-12) mediante:

$$A_{CI} = R(c_S - c_{TVE}) - A_{TFE} \qquad (25\text{-}145)$$

$$A_{NP} = R(c_S - c_{TVE}) - A_{TFE} - A_{BD} \qquad (25\text{-}146)$$

en donde c_{TVE} son los gastos variables totales por unidad de producción, A_{TFE} son los gastos fijos anuales totales de producción y venta de un producto, sin incluir provisiones anuales para depreciación de la planta, y A_{BD} es el cargo anual por depreciación en el balance.

Sin embargo, en un periodo contable determinado, el volumen de ventas puede ser distinto al volumen de producción. En este caso, el inventario de productos terminados, I_1, al principio del periodo contable (inventario inicial), diferirá del inventario final, I_2, y hay que escribir las ecuaciones (25-145) y (25-146) en forma modificada, como:

$$A_{CI} = R(c_S - c_{TVE}) - A_{TFE} + (I_1 - I_2) \qquad (25\text{-}147)$$

$$A_{NP} = R(c_S - c_{TVE}) - (A_{TFE} + A_{BD}) + (I_1 - I_2) \qquad (25\text{-}148)$$

Si el volumen anual de ventas excede del volumen anual de producción R en una cantidad ΔR, entonces las ecuaciones (25-147) y (25-148) se pueden escribir como

$$A_{CI} = R(c_S - c_{TVE}) - A_{TFE} + \Delta R(c_S - c_{INV}) \qquad (25\text{-}149)$$

$$A_{NP} = R(c_S - c_{TVE}) - (A_{TFE} + A_{BD}) + \Delta R(c_S - c_{INV}) \qquad (25\text{-}150)$$

en donde c_{INV} es el valor por unidad en inventario de producto terminado.

Por supuesto, el valor de c_{INV} influye en el ingreso anual de efectivo y en la utilidad neta anual. Ya que este ingreso es el dato básico para los métodos del cálculo de rentabilidad con (NPV) y (DCFRR), el valor real por unidad en inventario tiene gran importancia para los ingenieros químicos que efectúan estudios económicos.

Divídase la ecuación (25-150) entre la ecuación (25-87) para dar

$$\frac{A_{NP}}{A_S} = \left(1 - \frac{c_{TVE}}{c_S}\right) - \frac{(A_{TFE} + A_{BD})}{A_S} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)\left(1 - \frac{c_{INV}}{c_S}\right) \qquad (25\text{-}151)$$

$$\frac{A_{NP}}{A_S} = (\text{CSR}) - \frac{(A_{TFE} + A_{BD})}{A_S} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)\left(1 - \frac{c_{INV}}{c_S}\right) \qquad (25\text{-}152)$$

en donde (CSR) = $1 - (c_{TVE}/c_S)$ es la aportación a la relación del precio de venta. Cuando la relación entre utilidad neta anual e ingreso por ventas anuales, A_{NP}/A_S, se expresa como porcentaje, se le llama margen de utilidad.

Los términos (CRS) y $(A_{TFE} + A_{BD})/A_S$ tienen una magnitud similar para los procesos químicos. Por ejemplo, son típicos los valores de (CSR) de 0.1 a 0.4 y están muy cercanos a un valor de 0.2 que es común en las industrias de procesos para $(A_{TFE} + A_{BD})/A_S$. Entonces, el margen de utilidad es muy sensible al valor c_{INV} por unidad en inventario.

Considérese, por ejemplo, que (CSR) y $(A_{TFE} + A_{BD})/A_S$ son iguales a 0.3. En este caso, la ecuación (25-152) se puede escribir como

$$A_{NP}/A_S = (\Delta R/R)(1 - c_{INV}/c_S) \qquad (25\text{-}153)$$

Si el volumen de ventas supera al volumen anual de producción en 10% y el inventario se valúa al precio de venta, entonces la ecuación (25-153) indica que el margen de utilidad es $(A_{NP}/A_S)100 = 0\%$. Si se valúa el inventario al costo variable total, entonces el margen de utilidad $(A_{NP}/A_S)100 = (0.1)(1 - 0.7)(100) = 3\%$. Por tanto, el valor del inventario es de máxima importancia.

(25-87)

ıdes por año y c_s es el
esos anuales en efec-
stos A_{NP}, se expresan
ante:

(25-145)

A_{BD} (25-146)

or unidad de produc-
roducción y venta de
ra depreciación de la
en el balance.
inado, el volumen de
ción. En este caso, el
io del periodo conta-
al, I_2, y hay que escri-
modificada, como:

(25-147)

$I_1 - I_2$) (25-148)

ı anual de producción
25-147) y (25-148) se

v) (25-149)

$(c_S - c_{INV})$

(25-150)

io de producto termi-

eso anual de efectivo
el dato básico para los
y (DCFRR), el valor
ncia para los ingenie-

ón (25-87) para dar

$\left(1 - \frac{c_{INV}}{c_S}\right)$

(25-151)

$- \frac{c_{INV}}{c_S}\Big)$ (25-152)

la relación del precio
a anual e ingreso por
itaje, se le llama mar-

una magnitud similar
ípicos los valores de
r de 0.2 que es común
A_S. Entonces, el mar-
unidad en inventario.
$+A_{BD})/A_S$ son iguales
e escribir como

$_S$) (25-153)

ıal de producción en
entonces la ecuación
$_P/A_S)100 = 0\%$. Si se
es el margen de utili-
or tanto, el valor del

No existe un método de aceptación universal para valuar el inventario. El valor de c_{INV} por unidad se puede calcular sobre cualquiera de las siguientes bases:

1. Costo de material más mano de obra directos.
2. Material directo más mano de obra directa más otros gastos directos de producción. (Éste es el costo variable total de producción.)
3. Costo variable total de producción más gastos indirectos fijos de producción.
4. Costo variable total. (Incluye gastos de producción y generales.)
5. Costo total (Incluye costos variables y fijos de producción y gastos generales.)

Los métodos 1, 2 y 4 se denominan de costeo directo, costeo variable y costeo marginal respectivamente. Aunque el costeo directo se utiliza cada vez más para fines de contabilidad y control interno, las autoridades fiscales no lo aceptan como base para el cálculo de utilidades; las autoridades y muchos contadores prefieren el método 3, llamado de costeo por absorción. Este método tiene la desventaja de que el costo indirecto fijo por unidad se determina para un volumen normal determinado de producción. Si ese volumen excede del normal, hay sobreabsorción de gastos indirectos fijos. A la inversa, si el volumen de producción es menor que el normal, entonces hay subabsorción de gastos indirectos fijos. El método 5 de denomina de costeo por absorción total.

Casi todos están de acuerdo en que los gastos generales de administración, venta, distribución, etc., no se deben incluir en el costo del inventario, y consideran que no se debe absorber ningún costo hasta que no se haya erogado. En general, los ingenieros prefieren el método 2 y los contadores el método 3. Sin embargo, se acostumbra valuar ya sea al costo o al valor de mercado, el que sea menor. En los métodos citados, se pueden utilizar costos reales o estándar. Téngase en cuenta que el método 3 muestra mayores utilidades que el método 2 cuando el volumen de ventas es mayor que el de producción, y utilidades más bajas cuando la producción es mayor que las ventas.

Las utilidades totales antes de impuestos en la vida de un proyecto, son independientes del método utilizado para valuar el inventario. Con una vida o duración de n años del proyecto, la ecuación (25-148) se puede escribir como

$$\sum_0^n A_{NP} = \sum_0^n R(c_S - c_{TVE}) - \sum_0^n (A_{TFE} + A_{BD}) + \sum_0^n (I_m - I_{m+1}) \qquad (25\text{-}154)$$

en donde el último término de ella se convierte en $\sum_0^n (I_m - I_{m+1}) = I_0 - I_{n+1}$. Como no habrá material en inventario el año antes de que empiece el proyecto ni el año después de que termine, entonces $I_0 = I_{n+1} = 0$. Por ello, las utilidades totales no dependen de los valores individuales de I.

Sin embargo, la utilidad anual antes de impuestos, A_{NP}, sí depende del valor del inventario. Como los impuestos a pagar en cualquier año están basados en A_{NP}, la utilidad neta anual después de impuestos A_{NNP} depende también del método para valuar el inventario. Con frecuencia, se selecciona un método particular para valuar el inventario a fin de demorar el pago de impuestos hasta donde lo permite la ley.

Hasta ahora, sólo se ha considerado el inventario de productos terminados; también lo hay de materia prima y de trabajo en proceso, por ejemplo, materiales procesados parcialmente o productos intermedios que se deben tener en cuenta. Por ello, es necesario modificar las ecuaciones (25-147) hasta (25-154) para tomarlos en consideración.

Efecto de los precios de la materia prima Los precios de la materia prima para las industrias de procesos químicos están sujetos a grandes variaciones. Ahora se comentará su efecto sobre las utilidades.

Cuando los precios de las materias primas varían de una semana a otra, no todas las unidades en inventario se habrán comprado al mismo tiempo. Considérense χ unidades en existencia al comienzo del periodo de inventario, compradas al precio c_1 por unidad. Las cantidades adicionales χ_2, χ_3, etc., se compran a precios unitarios de c_2, c_3, etc. hasta que por fin se compran χ_n unidades al último precio de c_n por unidad, al final del periodo de inventario. El valor total del inventario, C_{INV}, al final del periodo, si no ha habido ningún retiro, se expresa con

$$C_{INV} = \sum_1^n \chi_j c_j \qquad (25\text{-}155)$$

El valor del inventario, I, depende en un momento dado de los valores asignados a las unidades retiradas. Hay cinco métodos para valuar los inventarios: **1)** FIFO (primeras entradas-primeras salidas), **2)** LIFO (últimas entradas-primeras salidas), **3)** costo promedio, **4)** costo estándar y **5)** valor de mercado.

Con el método FIFO, las unidades retiradas del almacén se valúan a su precio de compra, empezando con el primer artículo que se compró. Si se retira un número m de unidades del almacén durante el periodo, el costo total de estos artículos, sobre una base de FIFO, se expresa con:

$$C_{FIFO} = \sum_1^p \chi_j c_j + \left(m - \sum_1^p \chi_j\right) c_{p+1} \qquad (25\text{-}156)$$

siempre y cuando al valor de m satisfaga

$$m < \sum_0^n \chi_j$$

y en donde p es el entero más grande, de modo que

$$\sum_1^p \chi < m$$

Por tanto, el valor del inventario, I_{FIFO}, en cualquier tiempo dado, es

$$I_{FIFO} = C_I - C_{FIFO} \qquad (25\text{-}157)$$

En términos de las ecuaciones (25-155) y (25-156), la ecuación (25-157) se puede escribir como

$$I_{FIFO} = \sum_1^n \chi_j c_j - \sum_1^p \chi_j c_j - \left(m - \sum_1^p \chi_j\right) c_{p+1} \qquad (25\text{-}158)$$

Con el método LIFO, las m unidades retiradas del almacén se valúan a su precio de compra, empezando con el último artículo que se compró. En forma similar, el valor del material, C_{LIFO}, retirado del almacén se expresa mediante

$$C_{LIFO} = \sum_p^n \chi_j c_j + \left(m - \sum_p^n \chi_j\right) c_{p-1} \qquad (25\text{-}159)$$

en donde p es el entero más pequeño, de modo que

$$\sum_p^n \chi_j \le m$$

Por tanto, el valor del inventario, I_{LIFO}, en cualquier tiempo dado, es

$$I_{LIFO} = C_I - C_{LIFO} \qquad (25\text{-}160)$$

En términos de las ecuaciones (25-155) y (25-159), la ecuación (25-160) se puede escribir como

$$I_{LIFO} = \sum_1^n \chi_j c_j - \sum_p^n \chi_j c_j - \left(m - \sum_p^n \chi_j\right) c_{p-1} \qquad (25\text{-}161)$$

Ejemplo 20 Considérense 10 lotes sucesivos de materia prima, de 1000 unidades cada uno, comprados en un momento de precios al alza, en donde c_1 = \$0.10 por unidad, c_2 = \$0.11 por unidad, etc. (Tabla 25-28). El costo total de estas compras para inventario se encuentra, mediante la ecuación (25-155), que es de \$1450.

Calcúlese el valor del inventario de materia prima después de haber retirado 5500 unidades del almacén, primero con el empleo de FIFO y luego con el de LIFO.

Se sustituyen las cantidades correspondientes para FIFO en la ecuación (25-158), teniendo presente que p = 5, n = 10 y m = 5500, para obtener

TABLA 25-28 Costos de inventario con precios crecientes

p	x_j, unidades	c_j, \$/unidad	x_jc_j, \$	$\sum_1^p x_j$, unidades	$\sum_1^p x_jc_j$, \$	$\sum_p^n x_j$, unidades	$\sum_p^n x_jc_j$, \$
1	1 000	0.10	100	1 000	100	10 000	1 450
2	1 000	0.11	110	2 000	210	9 000	1 350
3	1 000	0.12	120	3 000	330	8 000	1 240
4	1 000	0.13	130	4 000	460	7 000	1 120
5	1 000	0.14	140	5 000	600	6 000	990
6	1 000	0.15	150	6 000	750	5 000	850
7	1 000	0.16	160	7 000	910	4 000	700
8	1 000	0.17	170	8 000	1 080	3 000	540
9	1 000	0.18	180	9 000	1 260	2 000	370
10	1 000	0.19	190	10 000	1 450	1 000	190

$$I_{\text{FIFO}} = \$1450 - \$600 - (5500 - 5000)(\$0.15)$$
$$I_{\text{FIFO}} = \$775$$

Se sustituyen, en forma similar, los valores para LIFO en la ecuación (25-161), excepto que p es ahora 6, para obtener:

$$I_{\text{LIFO}} = \$1450 - \$850 - (5500 - 5000)(\$0.14)$$
$$I_{\text{LIFO}} = \$530$$

Entonces, en una época de aumentos de precios de materia prima, el método FIFO da un valor más alto para el inventario disponible que el método LIFO. Cuando bajan los precios, el método FIFO dará un valor menor que LIFO para el inventario disponible.

Base de costo promedio para inventario Se pueden utilizar un promedio simple, SAV, o un promedio ponderado, WAV, para valuar el inventario.

Con el método de promedio simple, el valor C_{SAV} del material retirado del almacén se expresa con

$$C_{SAV} = m(c_1 + c_n)/2 \tag{25-162}$$

El valor del inventario, I_{SAV}, en cualquier fecha determinada es

$$I_{SAV} = C_I - C_{SAV} \tag{25-163}$$

En términos de las ecuaciones (25-155) y (25-162), la ecuación (25-163) se puede escribir como

$$I_{SAV} = \sum_1^n x_jc_j - [m(c_1 + c_n)/2] \tag{25-164}$$

Considérese el valor del inventario después de haber retirado 5500 unidades, con los datos de la tabla 25-28. A los materiales retirados se les asigna, sobre la base de promedio simple, un precio de (\$0.10 + \$0.19)/2 = \$0.145 por unidad. Ya que el costo total de materia prima para inventario, según la ecuación (25-155), es de \$1450, el valor del inventario después de haber retirado 5500 unidades se calcula, con la ecuación (25-164), que es

$$I_{SAV} = \$1450 - (5500)(\$0.145) = \$652.50$$

Con el método de promedio ponderado, el valor C_{WAV} del material retirado del almacén se expresa mediante

$$C_{WAV} = m \sum_1^n x_jc_j \Big/ \sum_1^n x_j \tag{25-165}$$

El valor del inventario, I_{WAV} en cualquier fecha determinada, es

$$I_{WAV} = C_I - C_{WAV} \tag{25-166}$$

En términos de las ecuaciones (25-153) y (25-164), la ecuación (25-166) se puede escribir como

$$I_{WAV} = \sum_1^n x_jc_j \left[1 - \left(m \Big/ \sum_1^n x_j\right)\right] \tag{25-167}$$

Se utilizará la ecuación (25-167) para valuar el inventario después de haber retirado 5500 unidades con los datos de la tabla 25-28

$$I_{WAV} = \$1450\,[1 - (5500/10\,000)] = \$652.50$$

En este ejemplo, los valores de I_{SAV} y de I_{WAV} son los mismos porque los lotes comprados son del mismo tamaño y los precios son linealmente progresivos. Esta combinación rara vez se encuentra en la práctica.

Los datos de la tabla 25-29 dan un ejemplo más realista cuando se trata de comprar al precio más bajo posible. Las cantidades compradas varían de acuerdo con el precio, pero algunas adquisiciones pueden haber sido hechas a precios altos para mantener la producción.

Sobre la base de los datos de la tabla 25-29, cuando se han retirado 5500 artículos del almacén, el valor del inventario con el empleo de los métodos de FIFO, LIFO, promedio simple (SAV) y promedio ponderado (WAV) es:

$$I_{\text{FIFO}} = \$1175 - \$560 - (5500 - 5200)(\$0.10)$$
$$I_{\text{FIFO}} = \$573.00$$
$$I_{\text{LIFO}} = \$1175 - \$645 - (5500 - 5000)(\$0.10)$$
$$I_{\text{LIFO}} = \$480.00$$
$$I_{SAV} = \$1175 - 5500\,[(\$0.10 + \$0.15)/2]$$
$$I_{SAV} = \$487.50$$
$$I_{WAV} = \$1175[1 - (5000/10\,000)]$$
$$I_{WAV} = \$528.75$$

Pros y contras de la valuación de inventario Con el método de valuación de inventario a precio estándar, todos los artículos se retiran al mismo precio. Además de su sencillez, este método tiene la ventaja de que se verifica en forma constante la eficiencia en las compras de materia prima.

Con los métodos de valuación al costo promedio y al costo estándar, los materiales no se cargan al costo real. Por tanto, la cantidad de utilidad o pérdida en el periodo puede variar según el método elegido para valuar el inventario. Por ello, los contadores (y a veces el fisco) insisten en que el método para valuación de inventario sea congruente de un periodo a otro. Esto hace que se trabaje por inercia, pero no impide cambiar el método, si hay justificación. En tales casos, se acostumbra informar de este cambio a los accionistas, porque influye en las utilidades declaradas.

No existe una forma correcta o incorrecta de valuar el inventario, aunque en algunos países las leyes fiscales no permiten ciertos métodos para el cálculo de impuestos. Por ejemplo, en Gran Bretaña no se permite el LIFO. Como regla general, el método utilizado debe ser el que haga pagar impuestos más bajos. Sin embargo, es un hecho aceptado que la congruencia es también una virtud en la valuación de inventarios.

Es importante reconocer que el método utilizado para valuar inventarios para fines de contabilidad de costos no es, por necesidad, el mismo que para preparar el balance y estados financieros. En este caso, el

TABLA 25-29 Costos de inventario con precios fluctuantes

p	x_j, unidades	c_j, \$/unidad	x_jc_j, \$	$\sum_1^p x_j$, unidades	$\sum_1^p x_jc_j$, \$	$\sum_p^n x_j$, unidades	$\sum_p^n x_jc_j$, \$
1	1 000	0.10	100	1 000	100	10 000	1 175
2	1 500	0.11	165	2 500	265	9 000	1 075
3	500	0.13	65	3 000	330	7 500	910
4	2 000	0.10	200	5 000	530	7 000	845
5	200	0.15	30	5 200	560	5 000	645
6	1 000	0.14	140	6 200	700	4 800	615
7	2 500	0.11	275	8 700	975	3 800	475
8	300	0.15	45	9 000	1,020	1 300	200
9	100	0.20	20	9 100	1 040	1 000	155
10	900	0.15	135	10 000	1 175	900	135

inventario después
a tabla 25-28

652.50

on los mismos por-
y los precios son
vez se encuentra en

s realista cuando se
ntidades compradas
quisiciones pueden
producción.
ando se han retirado
con el empleo de los
y promedio ponde-

200)($0.10)

00)($0.10)

5)/2]

Con el método de
s artículos se retiran
todo tiene la ventaja
a en las compras de

o y al costo estándar,
, la cantidad de utili-
método elegido para
ces el fisco) insisten
a congruente de un
cia, pero no impide
asos, se acostumbra
influye en las utili-

valuar el inventario,
miten ciertos méto-
Gran Bretaña no se
utilizado debe ser el
o, es un hecho acep-
la valuación de in-

o para valuar inven-
or necesidad, el mis-
eros. En este caso, el

ecios fluctuantes

$\sum_p^n x_f$, unidades	$\sum_p^n x_f c_f$, \$
10 000	1 175
9 000	1 075
7 500	910
7 000	845
5 000	645
4 800	615
3 800	475
1 300	200
1 000	155
900	135

inventario se valúa al costo obtenido por otro método o al valor de mercado, el que sea más bajo.

Control de inventario El tamaño óptimo del inventario depende del tipo de industria y del personal con que cuente la empresa. Los inventarios son muy altos en la industria del tabaco y pequeños en los negocios que manejan bienes perecederos. Cuanto más grande sea el inventario, mayores son los costos de almacenamiento y los que se relacionan con ellos; éstos incluyen seguros, impuestos, depreciación, manejo y protección, etc., y se puede considerar que son más o menos proporcionales al valor del inventario I. El costo anual A_{IW} para mantener un inventario con valor I se expresa mediante

$$A_{IW} = \alpha I \tag{25-168}$$

en donde α es el factor de proporcionalidad, que es del orden de 0.25 para muchas industrias.

Por contraste, se pueden reducir algunos costos si se tienen inventarios grandes. Por ejemplo, se pueden obtener descuentos más altos en las compras para entrega a granel. Además, los inventarios grandes disminuyen el peligro de perder ventas y prestigio porque no se interrumpirá la producción y, en consecuencia, no se agotarán las existencias de producto terminado.

El costo de colocar un pedido de materiales es en parte fijo y en parte variable. El costo anual de colocar pedidos A_{IO} se expresa por

$$A_{IO} = FN + VR \tag{25-169}$$

en donde F es el costo fijo por pedido, N es el número de pedidos por año, V es el costo variable de pedido por unidad de producción y R es el volumen anual de producción. Aunque el costo administrativo de colocar un pedido será más o menos fijo, los costos de transporte son proporcionales al tamaño del pedido y, por ello, durante el año son proporcionales al volumen anual de producción. El costo anual total del inventario, A_I, es la suma de las ecuaciones (25-168) y (25-169)

$$A_I = \alpha I + FN + VR \tag{25-170}$$

Para un número dado N de pedidos por año, el valor del inventario es proporcional a la magnitud U del pedido individual promedio. Entonces, la ecuación (25-170) se puede escribir como

$$A_I = \beta U + (FR/U) + VR \tag{25-171}$$

en donde β es un factor de proporcionalidad y el número N de pedidos por año se expresa como R/U.

Al diferenciar la ecuación (25-171) con respecto a U se puede calcular el tamaño óptimo del pedido. La diferencial es

$$dA_I/dU = \beta - (FR/U^2) \tag{25-172}$$

Al establecer el lado derecho de la ecuación (25-172) igual a cero, se obtiene

$$U = \sqrt{FR/\beta} \tag{25-173}$$

en donde U es el tamaño óptimo del pedido.

Se ha creado buen número de modelos para ayudar a la administración a manejar los inventarios en la forma más rentable que sea posible. Estos modelos se pueden aplicar a otros elementos del capital de trabajo, como el efectivo.

Capital de trabajo La cantidad y aplicación del capital de trabajo y la eficiencia con que se utilice determinan las perspectivas inmediatas de futuro crecimiento de una empresa. Una de las mayores preocupaciones de los administradores de una empresa es el manejo del capital de trabajo. Si éste es insuficiente o está manejado en forma inadecuada es la causa más común del fracaso de muchos negocios.

Los ingenieros encargados de los cálculos de costos tienden a hacer estimaciones del costo del capital fijo de un proyecto y dejan a los contadores el aspecto del capital de trabajo. Aunque el cálculo del costo del capital fijo es más fácil desde el punto de vista de ingeniería, la estimación del capital de trabajo es de vital importancia para el proyecto en sí y para la empresa como un todo.

El capital de trabajo puede ser desde 10% hasta casi el 100% del capital invertido, según sea la industria, y es un factor importante en el índice de rentabilidad de una empresa. Por esta razón, es preferible comparar el rendimiento de una empresa con otras que sean lo más semejantes que se pueda.

El capital de trabajo bruto se define como el activo circulante total; el capital de trabajo neto es el activo circulante menos el pasivo circulante. El activo circulante, por lo general, es de más de la mitad del activo total de la empresa. Cuando los contadores desean hacer resaltar el capital de trabajo en una empresa, presentan el balance en forma vertical (o de informe), tabla 25-30. El capital contable de \$91 650 aporta los fondos de \$38 650 (capital de trabajo neto) y de \$53 000 (activo fijo menos el préstamo a largo plazo). El flujo del capital de trabajo se ilustra, en forma diagramática, en la figura 25-39.

El capital de trabajo necesario varía de acuerdo con los volúmenes de ventas o de producción. Por ejemplo, las ventas y las cuentas por cobrar se duplicarían cuando se duplica el volumen de ventas. Además, un aumento en el volumen de ventas requiere, por lo general, mayor inventario de materia prima, de trabajo en proceso y de producto terminado, que inmovilizan el capital. Un aumento en el volumen de ventas puede ocasionar una escasez temporal de capital de trabajo. Esto, a su vez, puede significar que las cuentas por pagar no se liquidarán a tiempo, se perderán descuentos por pronto pago o habrá que pagar intereses o multas. Los acreedores pueden entablar acciones judiciales para cobrar, lo cual significará un desembolso adicional de la empresa en honorarios de abogados y costos judiciales. A menudo, otros acreedores harán lo mismo y ello puede ocasionar que una empresa, que en realidad tiene situación financiera sana, pueda ser declarada en suspensión de pagos o en quiebra.

Una escasez de efectivo puede impedir que una empresa aproveche los descuentos por compras grandes de materia prima. La importancia de la disponibilidad de efectivo o de valores de realización inmediata se puede ver si se piensa en una cuenta por pagar a 28 días neta o con 2% de descuento por pronto pago a los 7 días. Si no se tiene efectivo para pagar a los 7 días, eso equivale a pagar 2% de intereses sobre ese documento a los 21 días restantes, o sea, una tasa anual de interés compuesto de más del 41%.

El efectivo adecuado y los antecedentes del pago oportuno de las cuentas refuerzan la clasificación para crédito de una empresa y facilitan la obtención de créditos bancarios. Una empresa necesita dinero

TABLA 25-30 Balance de la Compañía BCD, diciembre 31, 1981

Activo circulante		
Efectivo	\$14 575	
Cuentas por cobrar	35 575	
Inventario:		
Materia prima	6 000	
Trabajo en proceso	3 750	
Producto terminado	10 000	
Capital de trabajo bruto		\$69 900
Pasivo circulante		
Cuentas por pagar	25 000	
Documentos por pagar	3 000	
Préstamos bancarios	3 000	
Acumulaciones por pagar	250	
		31 250
Capital de trabajo neto		\$38 650
Activo fijo	75 000	
Préstamo a largo plazo	22 000	
		\$53 000
Capital contable		\$91 650

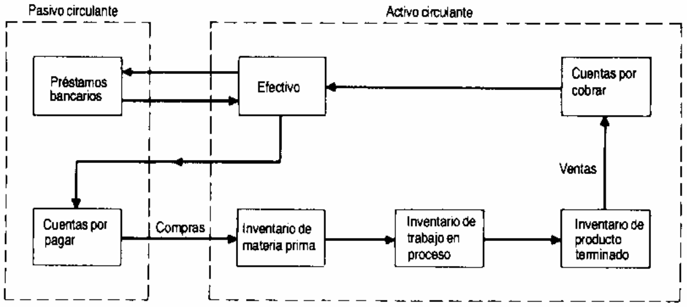


FIG. 25-39 Flujo de capital de trabajo que muestra la relación entre pasivo circulante y activo circulante.

adicional para contingencias como incendio, inundación, huelgas, etc., así como para la publicidad destinada a contrarrestar las actividades de los competidores. Este dinero adicional se suele tener en valores de renta fija, que se pueden realizar en un plazo de unos cuantos días.

Relaciones del capital de trabajo Los analistas financieros utilizan mucho las relaciones o razones para determinar la "salud" económica de una empresa. Para evaluar la capacidad de la empresa para mantener y ampliar sus operaciones con éxito, los analistas aplican una relación entre activo y pasivo corrientes y una relación rápida, llamada a veces prueba de ácido, como sigue:

$$\text{Relación entre circulantes} = \frac{\text{activo circulante}}{\text{pasivo circulante}} \qquad (25\text{-}142)$$

$$\text{Relación rápida} = \frac{\text{activo líquido}}{\text{pasivo líquido}} \qquad (25\text{-}143)$$

El activo líquido es el que se puede realizar de inmediato, como el efectivo, cuentas por cobrar y valores negociables. Aunque el inventario es activo circulante, no se puede considerar como activo líquido porque si se convierte en efectivo, se puede paralizar la empresa.

Aunque es deseable una relación alta entre circulantes, esto se puede lograr si se tienen inventarios innecesariamente altos que no producen ninguna utilidad excepto cuando los precios de los bienes de consumo suben con rapidez. La relación rápida es menos engañosa en este aspecto.

Una buena administración mantendrá los inventarios al mínimo nivel posible, en concordancia con la satisfacción de los clientes y la operación eficiente de la planta. El exceso de inventario es improductivo y es una inversión que tiene poco o ningún rendimiento. Ese exceso sólo se debe mantener cuando la oferta es errática o los precios van en aumento. La administración debe buscar una elevada relación de rotación de inventario, expresada mediante

Relación de rotación de inventario

$$= \frac{\text{ingresos por ventas anuales}}{\text{valor promedio del inventario}} \qquad (25\text{-}174)$$

También es buen sistema mantener las cuentas por cobrar a un nivel bajo y tener una elevada relación de rotación de cuentas por cobrar, como sigue:

Relación de rotación de cuentas por cobrar

$$= \frac{\text{ingresos por ventas anuales}}{\text{valor promedio de cuentas por cobrar}} \qquad (25\text{-}175)$$

Como opción, también es bueno tener un corto periodo promedio para cobranza, expresado como sigue:

Periodo promedio para cobranza

$$= \frac{\text{valor promedio de cuentas por cobrar}}{\text{ingresos por ventas por día}} \qquad (25\text{-}144)$$

La ecuación (25-144) indica el número de días en que los ingresos por ventas están inmovilizados en cuentas por cobrar.

Una relación de rotación de cuentas por cobrar de 12 se considera razonable para una empresa manufacturera. Esto implica un periodo promedio para cobranza de un mes. El precio de venta de los artículos debe incluir el interés (que se pueda ganar en otra forma) sobre el dinero inmovilizado durante ese tiempo.

Ya que las relaciones o razones, igual que el balance, son para un punto particular en el tiempo, tienen empleo limitado, salvo que se comparen con valores anteriores. Un estudio de la tendencia de las relaciones indica si una compañía está o no a punto de una crisis de capital de trabajo o de liquidez y puede permitir a la administración comparar el rendimiento de su empresa con las competidoras.

Estado de recursos En la tabla 25-31 aparece un estado de recursos típico, que muestra el cambio en el capital neto de trabajo y se puede obtener con los estados de cambio en el capital de trabajo (tabla 25-32). Un estado de recursos indica de dónde provino el efectivo y cómo se utilizó.

Los cambios en el capital de trabajo, ΔC_{WC}, en un periodo contable anual, se pueden representar mediante

$$\Delta C_{WC} = A_S - A_{TE} - \Sigma\Delta C_{FC} - \Sigma\Delta C_L + \Sigma\Delta C_{FIN} \qquad (25\text{-}176)$$

en donde A_S son los ingresos anuales por ventas del producto, A_{TE} es el gasto o costo total requerido para producir y vender el producto, pero sin incluir ninguna provisión anual para depreciación, $\Sigma\Delta C_{FC}$ es la suma de los cambios en los activos fijos depreciables, $\Sigma\Delta C_L$ es la suma de los cambios en los activos fijos no depreciables y $\Sigma\Delta C_{FIN}$ es la suma de los cambios en los recursos financieros como préstamos, bonos, acciones preferentes, acciones comunes, etc.

La ecuación (25-176) también se puede escribir como

$$\Delta C_{WC} = A_{CI} - \Sigma\Delta C_{FC} - \Sigma\Delta C_L + \Sigma\Delta C_{FIN} \qquad (25\text{-}177)$$

TABLA 25-31 Estado de recursos a diciembre 31, 1981

Fuentes de fondos		
Ingresos en efectivo por operaciones		$15 000
Nuevo financiamiento		10 000
Venta de equipo de planta		2 000
Total fuentes de fondos		$27 000
Aplicaciones de fondos		
Compra de terreno	$3 000	
Dividendos en efectivo	9 000	
Total aplicaciones de fondos		$12 000
Aumento en capital de trabajo neto		$15 000

TABLA 25-32 Es

Efectivo
Cuentas por cobrar
Inventarios
Total activo circulante
Pasivo circulante
Capital de trabajo neto
Relación de circulantes
Relación rápida

en donde A_{CI} son los
principal de recursos
esos ingresos no incl
mo el cargo anual A_B
ple operación en libr
Un valor positivo
plica un aumento en
minución. Por ejem
cios, terrenos, etc.,
fijos requiere esos f
nancieros en forma
una fuente de efecti
rescate de acciones
vidiendo en acciones
bolso de efectivo.
La relación entre
puestos, A_{CF}, para
puestos, A_{IT} y 3) el

La ecuación (25-
(25-177) para toda l
El estado de pérd
antes de impuestos
A_{CI} como una fuen
A_{NP}, expresada en
todos los gastos qu
A_{BD}, indicada en el
en forma errónea,
tras que los ingreso
Aunque A_{BD} no
cargo anual por de
impuestos, A_{IT}, ex

TABLA 25-32 Estado de cambios en el capital de trabajo

	Ene. 1, 1981	Ene. 1, 198Y	Cambio
Efectivo	$ 80 000	$ 94 000	+$14 000
Cuentas por cobrar	20 000	35 000	+ 15 000
Inventarios	30 000	25 000	− 5 000
Total activo circulante	$130 000	$154 000	+$24 000
Pasivo circulante	($ 60 000)	($ 69 000)	(+$ 9 000)
Capital de trabajo neto	$ 70 000	$ 85 000	+$15 000
Relación de circulantes	2.17	2.23	
Relación rápida	1.67	1.87	

en donde A_{CI} son los ingresos anuales de efectivo, que son la fuente principal de recursos para la mayor parte de las empresas. En este caso, esos ingresos no incluyen todos los gastos que no son en efectivo, como el cargo anual A_{BD} por depreciación en el balance, que es una simple operación en libros.

Un valor positivo de cualquier término de la ecuación (25-177) implica un aumento en el capital de trabajo, y un valor negativo una disminución. Por ejemplo, la venta de activo fijo como una planta, edificios, terrenos, etc., es una fuente de efectivo y la compra de activos fijos requiere esos fondos. Asimismo, un aumento en los recursos financieros en forma de préstamos y emisiones de acciones y bonos es una fuente de efectivo y ese efectivo se utiliza para pagar préstamos, rescate de acciones y bonos y pago de dividendos en efectivo. Un dividendo en acciones, al contrario de uno en efectivo, no es un desembolso de efectivo.

La relación entre 1) el flujo anual neto de efectivo después de impuestos, A_{CF}, para proyectos individuales, 2) el importe anual de impuestos, A_{IT} y 3) el desembolso anual de capital, A_{TC}, es

$$A_{CF} = A_{CI} - A_{IT} - A_{TC} \tag{25-178}$$

La ecuación (25-178) para un solo proyecto es análoga a la ecuación (25-177) para toda la empresa.

El estado de pérdidas y ganancias indica la utilidad neta anual, A_{NP}, antes de impuestos. Para determinar los ingresos anuales de efectivo, A_{CI} como una fuente de fondos, a partir del valor de la utilidad neta, A_{NP}, expresada en el estado de recursos, es necesario volver a sumar todos los gastos que no son en efectivo, como la depreciación anual, A_{BD}, indicada en el balance. Este método, a veces, parece indicar, pero en forma errónea, que la depreciación es una fuente de fondos, mientras que los ingresos en efectivo son la única fuente de ellos.

Aunque A_{BD} no influye en forma alguna en el capital de trabajo, el cargo anual por depreciación, A_D, influye en el importe anual de los impuestos, A_{IT}, expresados con

$$A_{IT} = (A_{CI} - A_D - A_A)t \tag{25-3}$$

en donde t es la tasa fraccionaria de impuestos y A_A es el importe anual de cualesquiera otras deducciones. Por tanto, los ingresos anuales netos de efectivo se alteran por los cargos por depreciación como sigue:

$$A_{NCI} = A_{CI} - A_{IT} \tag{25-2}$$

En este caso, la depreciación hace que haya capital de trabajo disponible porque se reduce el desembolso para pago de impuestos.

Cuando un activo fijo se vende a un precio distinto al de su valor en libros, se tiene una ganancia o pérdida en libros; ésta no influye en el capital de trabajo, que simplemente se ha aumentado en la suma de efectivo recibida por esa venta. Por ejemplo, si se vende una parte de la planta en $40 000 (sin que importe su valor en libros), el aumento en capital de trabajo por esa venta es de $40 000. Si el valor en libros de esa parte hubiera sido de $50 000, la pérdida en libros de $10 000 en esa venta se incluiría como gasto al calcular los ingresos de efectivo. Estos $10 000 se deben agregar a los ingresos en efectivo para obtener los ingresos en efectivo con exclusión de gastos que no son en efectivo según se requiere para A_{CI}. A la inversa, cualquier ganancia en libros en la venta de un activo fijo se debe restar si se ha incluido en los ingresos en efectivo.

Los valores en libros de los activos fijos se determinan con el cargo anual por depreciación en el balance, A_{BD}, que no altera el capital de trabajo. Aunque la ganancia o pérdida en libros en una venta de activo fijo está basada en su valor en libros, no se altera el capital de trabajo con los cargos por depreciación.

En una empresa se efectúan transacciones que cambian las características del capital neto de trabajo pero no influyen en su valor. Por ejemplo, un pago en efectivo de $10 000 para cuentas por pagar reduce el activo circulante en efectivo en $10 000 y el pasivo circulante en cuentas por pagar también en $10 000; el capital neto de trabajo no cambia. Sin embargo, esta transacción modifica las relaciones de circulantes y rápida.

Después del balance y el estado de pérdidas y ganancias, el estado de recursos se suele considerar como el documento financiero más importante. Sin embargo, muchos gerentes de finanzas consideran de igual importancia un estado que muestre los cambios en el efectivo.

El balance, el estado de pérdidas y ganancias y el estado de recursos no tienen un formato inflexible, pues varían en la cantidad de detalles y en su presentación física. Los estados de recursos ayudan a la administración a planear para el futuro, por ejemplo, en cuanto a la oportunidad y la provisión financiera para futuros gastos.

En la tabla 25-33 se presenta un estado típico de cambios en el capital de trabajo y en las fuentes y aplicaciones de fondos. Está basado en la siguiente relación: un aumento en la aplicación de fondos es igual a

TABLA 25-33 Estado de cambios en el capital de trabajo y en fuentes y aplicaciones de fondos, Compañía BCD

	Balance		Cambio en los fondos	
	Dic. 31, 198X	Dic. 31, 198Y	Aplicaciones	Fuentes
Efectivo	$ 14 575	$ 13 000		$ 1 575
Cuentas por cobrar	35 575	36 000	$ 425	
Inventarios	19 750	20 750	1 000	
Total activo circulante	$ 69 900	$ 69 750		
Cuentas por pagar	$ 25 000	$ 27 000		2 000
Documentos por pagar	3 000	2 500	500	
Préstamos bancarios	3 000	2 000	1 000	
Acumulaciones por pagar	250	300		50
Total pasivo circulante	$ 31 250	$ 31 800		
Capital de trabajo neto	$ 38 650	$ 37 950		
Activo fijo	75 000	85 000	10 000	
Activo neto	$113 650	$122 950		
Préstamo a largo plazo	$ 22 000	$ 22 000		
Capital contable	$ 91 650	$100 950		9 300
			$12 925	$12 925

un aumento en las fuentes de fondos. Esta relación también se puede presentar como sigue: un aumento en el activo más una disminución en el pasivo es igual a un aumento en el pasivo más una disminución en el activo.

Según la tabla 25-33, los ingresos en efectivo del año se han absorbido en el aumento del capital contable, que consta de las acciones en circulación más las utilidades retenidas.

Consideraciones generales Muchas personas consideran que la administración del capital de trabajo es un problema de flujo de efectivo. Por supuesto, el crecimiento requiere más inversión en activo fijo y en las diversas partidas que constituyen el activo circulante, y todo ello requiere efectivo. Si esto conduce a una escasez de efectivo y la empresa no puede pagar sus pasivos, ocurre la situación de insuficiencia de capital y la empresa, a fin de cuentas, se vería obligada a la liquidación. Por tanto, es esencial que una empresa tenga acceso a efectivo o a fuentes de financiamiento a corto plazo de fácil disponibilidad, de preferencia sin tener que garantizar el crédito con alguno de sus bienes, pues esa garantía sólo se puede otorgar a su valor de realización, que es mucho menor que el valor real.

Las cuentas por pagar son la principal fuente de financiamiento a corto plazo y ascienden, por lo general, a alrededor del 40% del pasivo circulante de la empresa. Ese financiamiento resulta muy costoso cuando no se pueden aprovechar los descuentos por pronto pago.

La segunda fuente en importancia de financiamiento a corto plazo son los pagarés descontados en los bancos. Los bancos, por lo general, requieren que el deudor mantenga un saldo para compensación. Por ejemplo, si una empresa requiere un préstamo de $100 000, debe solicitar una cantidad mayor, por ejemplo, $120 000 y pagar intereses sobre el total, a fin de mantener un saldo mínimo en cuenta de cheques de $20 000. Los bancos pueden ofrecer también otros servicios de gran ayuda para las empresas con dificultades financieras temporales.

La tercera fuente en importancia de financiamiento a corto plazo son los pagarés, llamado también papel comercial, de empresas muy grandes. Es el financiamiento más barato. Sin embargo, la suma de dinero disponible es función del sobrante de liquidez de las empresas grandes en un momento y esos pagarés, por lo general, se tienen que pagar al vencimiento, que puede ser a plazo muy corto.

Algunas veces se compra activo fijo con préstamos a corto plazo que pueden ocasionar problemas de liquidez. Los activos fijos, casi siempre, se deben financiar con capital a largo plazo o permanente, como las acciones y los bonos. Si una empresa ha demostrado que maneja bien su capital de trabajo, le será más fácil obtener el capital a largo plazo que requiera, porque habrá logrado la confianza de los banqueros y los accionistas.

Presupuestos y control de costos R. J. Bull (*Accounting in Business*, 2a. ed., Butterworth, London, 1972, p. 163) definió un presupuesto como un plan completo y coordinado, expresado en términos monetarios, para ordenar y controlar los recursos y actividades comerciales de una empresa durante un periodo específico en el futuro. Un presupuesto no es un pronóstico, pues éste es una estimación a futuro que se puede o no lograr. Un presupuesto es un objetivo general basado en un pronóstico. Además, el presupuesto define los objetivos detallados que deben alcanzar los diversos niveles de la administración de la empresa. Como el logro de esos objetivos requiere la cooperación total de la administración, los objetivos deben ser realistas con base en los recursos y el rendimiento en el pasado.

Se puede utilizar una comparación de los resultados reales contra los presupuestados, como base para el control en una empresa, departamento, planta o proyecto. Además, se debe tener un registro continuo de los resultados a fin de tener datos para la preparación de los futuros presupuestos.

Ya que las empresas suelen publicar sus estados financieros una vez al año, el periodo presupuestario también suele ser de un año; sin embargo, ese periodo puede variar mucho según la naturaleza de las operaciones. Por ejemplo, un presupuesto de ventas puede ser para un periodo de 3 o 6 meses, mientras que el periodo presupuestario para instalar una central nuclear abarcará muchos años.

Los objetivos básicos de los presupuestos son la planeación y el control. El primer paso es determinar el factor limitante. Por ejemplo, las ventas presupuestadas no pueden exceder de la capacidad productiva máxima de la planta. Como todas las actividades de la planeación están interrelacionadas, el alcance de la planeación se determina con el factor limitante.

Una vez que se pone en marcha el plan, se vigilan los resultados contra normas establecidas. Después, estos datos pueden ocasionar una modificación del plan para un logro más eficaz de los objetivos.

R. Pilcher (*Appraisal and Control of Project Costs*, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1973, p. 233) expresó que las finalidades de un sistema de control de costos son:

1. Dar una advertencia inmediata de operaciones antieconómicas a largo y a corto plazo.
2. Proporcionar la retroalimentación pertinente, calificada cuidadosamente en los detalles por todas las condiciones en que se ha efectuado el trabajo, al calculista encargado de establecer las normas en el pasado y en el futuro.
3. Suministrar datos para ayudar en la valuación de las variaciones que puedan surgir en el curso del trabajo.
4. Promover la conciencia por los costos.
5. Resumir los logros.

Los estados de pérdidas y ganancias presupuestadas son de formato idéntico a los estados normales. Sin embargo, las cifras presupuestadas son objetivos en vez de logros. Se utilizan cada vez más los modelos presupuestarios basados en ecuaciones matemáticas y se pueden utilizar para determinar con rapidez el efecto de los cambios en las variables. El análisis de la varianza se comenta en la descripción del cálculo de los costos de manufactura.

CÁLCULO DE LOS COSTOS DE MANUFACTURA

Los costos o gastos anuales de manufactura A_{ME} son la suma del costo directo o primo de manufactura A_{DME} y de los costos indirectos de manufactura A_{IME}:

$$A_{ME} = A_{DME} + A_{IME} \tag{25-179}$$

La determinación de los costos directos o primos es más fácil que la de los costos indirectos. Cuando se trata de más de un producto, surge la interrogante de la distribución correcta de los costos indirectos entre los diversos productos.

Además de los costos fijos y variables, también hay los costos mixtos o semivariables, que tienen un elemento fijo y uno variable. El variable puede variar de acuerdo con la producción en forma lineal, escalonada o curvilínea. Sin embargo, es más sencillo y conveniente dividir todos los costos de manufactura en fijos y variables linealmente.

Consideraciones generales Es preferible considerar los costos de manufactura en el contexto de las cuentas de manufactura, comercialización y pérdidas y ganancias. En las tablas 25-34, 25-35 y 25-36 se presentan ejemplos típicos, basados en el periodo contable normal de un año.

La utilidad bruta anual, A_{GP}, (Tabla 25-35) depende del cargo anual por depreciación, A_{BD}, en el balance, que no siempre es el mismo que la depreciación utilizada para deducción de impuestos. Ya que A_{BD} se selecciona en forma arbitraria, se puede emplear para hacer que la utilidad bruta anual, A_{GP}, sea más alta o más baja según la política de la empresa.

TABLA 25-34 Cu

Inventario de materia pri
Más: Compras
Más: Fletes y acarreos

Menos: Inventario de m
diciembre 31, 198X
Costo de materia prima
Sueldos y salarios direct
Servicios generales dire
Otros gastos directos
Costo primo de manufa
Nómina directa
Gastos indirectos gener
Otros gastos indirectos
Gastos indirectos de ma
Depreciación, A_{BD}

Más: Trabajo en proces

Menos: Trabajo en proc
Costo de producción de

La utilidad bruta a
luación del inventari
prima al principio del
precio puede haber a
ejercicio contable. Si
compra más alto, el c
es más elevada que s
pra. Aunque en este c
pagar más impuestos
La utilidad depen
proceso. Considére
costo primo de manu
directo adicional de
den 90 000 kg del pro
del inventario es de $
$1 500 cuando se agr
senso universal acer
deben absorber en el
ción y es el más com
el que prefieren los i
El ingreso anual,
los ingresos por ven
de los costos totales
ducto, sin incluir ca

$A_{CI} = [A_S - ($

en donde A_{VGE} y A_V
gastos variables de
los gastos anuales f
Los ingresos por

en donde R es el vol
unidad de producto.

TABLA 25-35 (

Inventario de product
Más: Costos de produ

Menos: Inventario de

Utilidad bruta
Ventas

TABLA 25-34 Cuenta de manufactura

Inventario de materia prima, enero 1, 1981	$ 35 000	
Más: Compras	870 000	
Más: Fletes y acarreos	25 000	
	$ 930 000	
Menos: Inventario de materia prima, diciembre 31, 198X	51 000	
Costo de materia prima consumida	$ 879 000	
Sueldos y salarios directos	122 000	
Servicios generales directos	22 000	
Otros gastos directos	104 000	
Costo primo de manufactura, A_{DME}	$1 127 000	$1 127 000
Nómina directa	28 000	
Gastos indirectos generales	52 000	
Otros gastos indirectos	52 000	
Gastos indirectos de manufactura, A_{IME}	$ 132 000	
Depreciación, A_{BD}	68 000	
	$ 200 000	200 000
		$1 327 000
Más: Trabajo en proceso, Ene. 1, 198X		30 000
		$1 357 000
Menos: Trabajo en proceso, Dic. 31, 198X		35 000
Costo de producción de los productos		$1 322 000

La utilidad bruta anual, A_{GP}, también depende del método para valuación del inventario. Por ejemplo, se puede haber comprado materia prima al principio del ejercicio contable a 9 centavos el kilogramo. Ese precio puede haber aumentado a 12 centavos el kilogramo al final del ejercicio contable. Si la valuación del inventario se hace al precio de compra más alto, el costo de producción es más bajo y la utilidad bruta es más elevada que si se hace la valuación al precio más bajo de compra. Aunque en este caso la utilidad bruta es mayor, también habrá que pagar más impuestos.

La utilidad depende también del método para valuar el trabajo en proceso. Considérese la manufactura de 100 000 kg de producto, con costo primo de manufactura de 10 centavos por kilogramo y costo indirecto adicional de 5 centavos por kilogramo. Se supone que se venden 90 000 kg del producto y se tienen 10 000 kg en inventario. El valor del inventario es de $1000 sobre la base del costo primo o directo y de $1500 cuando se agregan los costos indirectos. Todavía no hay un consenso universal acerca de si los gastos indirectos de manufactura se deben absorber en el costo. Este sistema se llama de costeo por absorción y es el más común. El costeo directo se utiliza cada vez más y es el que prefieren los ingenieros.

El ingreso anual, A_{CI}, antes de impuestos, expresado en términos de los ingresos por ventas anuales, A_S, de un producto y los componentes de los costos totales anuales requeridos para producir y vender el producto, sin incluir cargos por depreciación de la planta, se indica con

$$A_{CI} = [A_S - (A_{VGE} + A_{VME})] - (A_{FGE} + A_{FME}) \quad (25\text{-}180)$$

en donde A_{VGE} y A_{VME}, son los gastos anuales variables generales y los gastos variables de manufactura, respectivamente y A_{FGE} y A_{FME} son los gastos anuales fijos generales y de manufactura, respectivamente.

Los ingresos por ventas anuales son:

$$A_S = Rc_S \quad (25\text{-}181)$$

en donde R es el volumen de producción y c_S es el precio de venta por unidad de producto.

TABLA 25-35 Cuenta de compras y ventas

Inventario de producto terminado, enero 1, 1981	$ 200 000
Más: Costos de producción de los productos	1 322 000
	$1 522 000
Menos: Inventario de producto terminado, diciembre 31, 198X	190 000
	$1 332 000
Utilidad bruta	668 000
Ventas	$2 000 000

TABLA 25-36 Cuenta de pérdidas y ganancias

Administración	$ 74 000	
Ventas y embarques	124 000	
Publicidad y mercadotecnia	40 000	
Servicio técnico	10 000	
Investigación y desarrollo	60 000	
	$308 000	$308 000
Utilidad neta antes de impuestos		360 000
Utilidad bruta		$668 000

Asimismo, A_{VGE}, se puede considerar como proporcional al volumen anual de producción R y los gastos variables generales c_{VGE}, por unidad de producto:

$$A_{VGE} = Rc_{VGE} \quad (25\text{-}182)$$

De manera similar, para A_{VME},

$$A_{VME} = Rc_{VME} \quad (25\text{-}183)$$

En la práctica, los costos directos variables anuales como materia prima, servicios, etc., no son siempre proporcionales al volumen de producción.

Al sustituir las ecuaciones (25-181), (25-182) y (25-183) en el primer término del lado derecho de la ecuación (25-180), se tiene:

$$A_S - (A_{VGE} + A_{VME}) = R[c_s - (c_{VGE} + c_{VME})] \quad (25\text{-}184)$$

En la ecuación (25-184), el término $[c_S - (c_{VGE} + c_{VME})]$ es la aportación a los ingresos en efectivo.

Para la producción simultánea de más de un artículo, la ecuación (25-184) se puede escribir como

$$A_S - (A_{VGE} + A_{VME}) = R_1\{(c_S)_1 - [(c_{VGE})_1 + (c_{VME})_1]\} + R_2\{(c_S)_2 - [(c_{VGE})_2 + (c_{VME})_2]\} + \dots \quad (25\text{-}185)$$

en donde los subíndices 1, 2, etc., indican los diversos coproductos.

La aportación de un producto particular a los ingresos en efectivo depende del método contable. Se pueden calcular valores muy distintos para esa aportación, al utilizar métodos diferentes para asignar los gastos de manufactura.

El costo de cada partida en un cálculo de costos se debe presentar en forma de que se pueda modificar y actualizar en el futuro, cuando se cuente con datos revisados.

Los datos publicados y los métodos abreviados de cálculo se pueden emplear para determinar el costo aproximado de manufactura de un nuevo producto. Muchas empresas tienen datos detallados de las diversas partidas de costo, como indirectos, impuestos a la propiedad, etc., y se deben utilizar siempre que sea posible para lograr el cálculo más exacto para la empresa.

Para un nuevo producto, se debe comparar la relación entre gastos de manufactura y precio de venta c_{ME}/c_S contra la relación de costo total de manufactura e ingresos por ventas de toda la empresa. Si la relación c_{ME}/c_S es menor o igual que la de la empresa, entonces el precio de venta propuesto parece ser razonable y el producto quizá sea comercialmente viable. Por supuesto, esta comparación sólo se utiliza como guía aproximada en los cálculos preliminares.

Un producto principal y subproductos Supóngase que una unidad de materia prima produce χ_1, χ_2, etc., pesos de productos, 1, 2, etc., respectivamente. Los costos variables generales por unidad de materia prima serán c_{VGE} y los costos o gastos variables de manufactura para la misma serán c_{VME}. La unidad de materia prima puede ser un solo material o mezcla de ellos. I. Leibson y G. A. Trischman [*Chem. Eng.*, **78,** 69-74 (mayo 31, 1971)] mostraron los efectos sobre los gastos de manufactura de materiales de base alternos, con diferentes composiciones y costos para hacer los mismos productos.

Si el producto 1 es el principal, entonces soporta todos los gastos variables, de modo que

$$(c_{VGE})_1 = c_{VGE}/\chi_1 \qquad (25\text{-}186)$$

$$(c_{VME})_1 = c_{VME}/\chi_1 \qquad (25\text{-}187)$$

en donde $(c_{VGE})_1$ y $(c_{VME})_1$ son los gastos variables generales y variables de manufactura por unidad del producto 1.

Para el producto, 2, etc., $(c_{VGE})_2 = 0$ y $(c_{VME})_2 = 0$, etc. En este caso, la ecuación (25-184) se convierte en

$$A_S - (A_{VGE} + A_{VME}) = R_1\,[(c_S)_1 - (c_{VGE} + c_{VME})/\chi_1] + R_2(c_S)_2 + \ldots \qquad (25\text{-}188)$$

Si R es el consumo anual de materia prima, entonces:

$$R_1 = \chi_1 R \qquad (25\text{-}189)$$

$$R_2 = \chi_2 R \qquad (25\text{-}190)$$

En términos de una unidad de materia prima, la ecuación (25-185) se puede combinar con las ecuaciones (25-189) y (25-190) y escribirla como

$$[A_S - (A_{VGE} + A_{VME})]/R = \chi_1(c_S)_1 - (c_{VGE} + c_{VME}) + \chi_2(c_S)_2 + \ldots \qquad (25\text{-}191)$$

La ecuación (25-191) indica la aportación de los productos 1, 2, etc., por unidad de materia prima. En este caso particular, la aportación del producto principal por peso unitario de materia prima es $\chi_1(c_S)_1 - (c_{VGE} + c_{VME})$. La aportación del producto 2 es $\chi_2(c_S)_2$, es decir, su precio de venta por unidad de peso de materia prima.

Dos productos principales

Por peso Supóngase que una unidad de materia prima rinde χ_1 y χ_2 pesos de productos 1 y 2 respectivamente. El gasto variable general por unidad de materia prima será c_{VGE} y el gasto variable de manufactura será c_{VME}. En la práctica, es raro que $\chi_1 + \chi_2$ sean exactamente la unidad.

Si los gastos variables se prorratean o comparten por peso, entonces:

$$(c_{VGE})_1 = \chi_1 c_{VGE}/[(\chi_1 + \chi_2)\chi_1] \qquad (25\text{-}192)$$

$$(c_{VME})_1 = \chi_1 c_{VME}/[(\chi_1 + \chi_2)\chi_1] \qquad (25\text{-}193)$$

$$(c_{VGE})_2 = \chi_2 c_{VGE}/[(\chi_1 + \chi_2)\chi_2] \qquad (25\text{-}194)$$

$$(c_{VME})_2 = \chi_2 c_{VME}/[(\chi_1 + \chi_2)\chi_2] \qquad (25\text{-}195)$$

en donde $(c_{VGE})_1$ y $(c_{VME})_1$ son los gastos variables generales y los variables de manufactura por unidad del producto 1 y $(c_{VGE})_2$ y $(c_{VME})_2$ son los gastos comparables para el producto 2.

Para este ejemplo, la ecuación (25-185) se convierte en:

$$A_S - (A_{VGE} + A_{VME}) = R_1\left[(c_S)_1 - \frac{(c_{VGE} + c_{VME})}{(\chi_1 + \chi_2)}\right] + R_2\left[(c_S)_2 - \frac{(c_{VGE} + c_{VME})}{(\chi_1 + \chi_2)}\right] \qquad (25\text{-}196)$$

En las ecuaciones (25-192) hasta (25-196), la suma de χ_1 y χ_2 puede ser de 1 o menor. Este análisis se puede aplicar a cualquier número de coproductos.

En términos de una unidad de materia prima, la ecuación (25-196) se puede combinar con las ecuaciones (25-189) y (25-190) y escribirla como

$$\frac{A_S - (A_{VGE} + A_{VME})}{R} = \chi_1\left[(c_S)_1 - \frac{(c_{VGE} + c_{VME})}{(\chi_1 + \chi_2)}\right] + \chi_2\left[(c_S)_2 - \frac{(c_{VGE} + c_{VME})}{(\chi_1 + \chi_2)}\right] \qquad (25\text{-}197)$$

La ecuación (25-197) indica la aportación de los productos 1 y 2 por unidad de peso de materia prima.

Por valor Supóngase que una unidad de materia prima rinde χ_1 y χ_2 pesos de productos 1 y 2 respectivamente, cuyos valores son $\chi_1(c_S)_1$ y $\chi_2(c_S)_2$; $(c_S)_1$ y $(c_S)_2$ son los precios de venta de los productos 1 y 2 por unidad de producción.

Supóngase que los gastos variables generales por unidad de materia prima son c_{VGE} y los variables de manufactura por unidad de materia prima son c_{VME}. Si los gastos variables se prorratean o comparten por valor, entonces:

$$(c_{VGE})_1 = \frac{\chi_1(c_S)_1 c_{VGE}}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]\chi_1} \qquad (25\text{-}198)$$

$$(c_{VME})_1 = \frac{\chi_1(c_S)_1 c_{VME}}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]\chi_1} \qquad (25\text{-}199)$$

$$(c_{VGE})_2 = \frac{\chi_2(c_S)_2 c_{VGE}}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]\chi_2} \qquad (25\text{-}200)$$

$$(c_{VME})_2 = \frac{\chi_2(c_S)_2 c_{VME}}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]\chi_2} \qquad (25\text{-}201)$$

en donde $(c_{VGE})_1$ y $(c_{VME})_1$ son los gastos variables generales y de manufactura por unidad del producto 1 y $(c_{VGE})_2$ y $(c_{VME})_2$ lo son para el producto 2.

En este caso, la ecuación (25-185) se convierte en:

$$A_S - (A_{VGE} + A_{VME}) = R_1\left\{(c_S)_1 - \frac{(c_S)_1(c_{VGE} + c_{VME})}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]}\right\} + R_2\left\{(c_S)_2 - \frac{(c_S)_2(c_{VGE} + c_{VME})}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]}\right\} \qquad (25\text{-}202)$$

Este análisis se puede extender para cualquier número de coproductos.

En términos de una unidad de materia prima, la ecuación (25-202) se puede combinar con las ecuaciones (25-189) y (25-190) y escribirla como:

$$\frac{A_S - (A_{VGE} + A_{VME})}{R} = \chi_1\left\{(c_S)_1 - \frac{(c_S)_1(c_{VGE} + c_{VME})}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]}\right\} + \chi_2\left\{(c_S)_2 - \frac{(c_S)_2(c_{VGE} + c_{VME})}{[\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2]}\right\} \qquad (25\text{-}203)$$

La ecuación (25-203) indica la aportación de los productos 1 y 2 por peso unitario de materia prima.

Ejemplo 21 Se utiliza un kilogramo de materia prima para manufacturar $\chi_1 = 0.32$ kg de producto 1 y $\chi_2 = 0.64$ kg de producto 2. El resto del material es desperdicio. El producto 1 se vende a $(c_S)_1 = 40$ centavos por kilogramo y el producto 2 se vende a $(c_S)_2 = 12$ centavos por kilogramo. Los gastos variables generales y de manufactura, que incluyen la materia prima, $c_{VGE} + c_{VME}$, son un total de 10 centavos por kilogramo.

Calcúlense: *a*) la aportación total a los ingresos en efectivo por kilogramo de materia prima y *b*) la aportación individual de cada producto a esos ingresos, por kilogramo de materia prima, para lo siguiente:

Caso	Condición
1	Al producto 1, como producto principal, se le cargan todos los gastos variables
2	Al producto 2, como producto principal, se le cargan todos los gastos variables
3	A los productos 1 y 2 se les prorratean los gastos variables sobre la base del peso
4	A los productos 1 y 2 se les prorratean los gastos variables sobre la base del valor

Caso 1. Para obtener la aportación total por kilogramo de materia prima, se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación (25-191). Para estas condiciones:

$$\begin{aligned}\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2 - (c_{VGE} + c_{VME}) &= 0.32(40 \text{ cents/kg}) + 0.64(12 \text{ cents/kg}) - 10 \text{ cents/kg}\\ &= 12.8 \text{ cents/kg} + 7.68 \text{ cents/kg} - 10 \text{ cents/kg}\\ &= 10.48 \text{ cents/kg}\end{aligned}$$

La aportación o contribución del producto 1, que es el principal, es de 12.8 centavos – 10 centavos = 2.8 centavos por kilogramo de materia prima. La aportación individual del producto 2, que es subproducto, es de 7.68 centavos por kilogramo de materia prima.

Caso 2. La aportación total cuando el producto 2 es el principal, también se obtiene con la ecuación (25-191) e igual que en el caso 1, se encuentra que es de 10.48 centavos por kilogramo.

La aportación individual del producto 2 como principal es de 7.68 centavos – 10 centavos = –2.32 centavos por kilogramo de materia prima. La aportación del producto 1 como subproducto es de 12.8 centavos por kilogramo de materia prima.

Caso 3. Cuando a los productos 1 y 2 se les prorratean los gastos variables sobre la base del peso, para encontrar la aportación total por kilogramo de materia prima, se sustituyen los costos unitarios en la ecuación (25-197). Los valores para cada término son:

$$\chi_1(c_S)_1 = 12.8 \text{ cents/kg} \qquad \text{(igual al Caso 1)}$$
$$\chi_2(c_S)_2 = 7.68 \text{ cents/kg} \qquad \text{(igual al Caso 1)}$$
$$[\chi_1/(\chi_1 + \chi_2)](c_{VGE} + c_{VME}) = (0.32/0.96)(10 \text{ cents/kg}) = 3.34 \text{ cents/kg}$$
$$[\chi_2/(\chi_1 + \chi_2)](c_{VGE} + c_{VME}) = (0.64/0.96)(10 \text{ cents/kg}) = 6.66 \text{ cents/kg}$$

Por tanto, la aportación total será de 12.8 + 7.68 – 3.34 – 6.66 = 10.48 centavos por kilogramo.

La aportación individual del producto 1 es de 12.8 centavos – 3.34 centavos = 9.46 centavos por kilogramo de materia prima. La del producto 2 es de 7.68 centavos – 6.66 centavos = 1.02 centavos también por kilogramo de materia prima.

Caso 4. Cuando a los productos 1 y 2 se les prorratean los gastos variables sobre la base del valor, para encontrar la aportación total por kilogramo de materia prima se sustituyen los costos unitarios en la ecuación (25-203). Los valores para cada término son:

$$\chi_1(c_S)_1 = 12.8 \text{ cents/kg} \qquad \text{(igual al Caso 1)}$$
$$\chi_2(c_S)_2 = 7.68 \text{ cents/kg} \qquad \text{(igual al Caso 1)}$$
$$\frac{\chi_1(c_S)_1(c_{VGE} + c_{VME})}{\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2} = \frac{(12.8)(10)}{12.8 + 7.68} = 6.24 \text{ cents/kg}$$
$$\frac{\chi_2(c_S)_2(c_{VGE} + c_{VME})}{\chi_1(c_S)_1 + \chi_2(c_S)_2} = \frac{(7.68)(10)}{12.8 + 7.68} = 3.76 \text{ cents/kg}$$

Por tanto, la aportación total será de 12.8 + 7.68 – 6.24 – 3.76 = 10.48 centavos por kilogramo.

La aportación individual del producto 1 es de 12.8 centavos – 6.24 centavos = 6.56 centavos por kilogramo de materia prima. La del producto 2 es de 7.68 centavos – 3.76 centavos = 3.92 centavos, también por kilogramo de materia prima.

Costos directos de manufactura Los costos directos de manufactura incluyen materia prima, mano de obra, servicios generales y algunos conceptos diversos. A continuación se describe cada uno.

Materia prima El costo de la materia prima suele ser la partida más grande en el costo de manufactura de cualquier producto. La cantidad de materia prima consumida se puede calcular a partir del balance de materiales.

Los costos de material se suelen presentar convenientemente en forma de tablas que indican: nombre, forma y grado del material, método de entrega, unidad de medición, costo por unidad, origen del costo, consumo anual, costo anual, consumo fraccionario por unidad de producción y costo por unidad de producción.

Se debe utilizar el consumo neto de materiales para los catalizadores, disolventes, ayudas para filtros, etc., que pueden tener un valor de recuperación. En las publicaciones especializadas aparecen los precios vigentes de productos químicos, pero cuando sea posible se deben solicitar al proveedor.

Puede ser posible que una empresa negocie la compra de un material a un precio unitario mucho menor que el precio vigente; esto ocurre en especial cuando se trata de grandes cantidades. Por tanto, se deben calcular los costos mínimo y máximo. Las tendencias de los precios, la disponibilidad y la calidad son otros factores que se deben tener en cuenta. Es importante conocer las tendencias de los precios para un producto que una empresa no manufacturará hasta dentro de algunos años.

El rendimiento de una reacción química determina las cantidades de materiales en el balance de materiales. Se utilizan los rendimientos supuestos para tener cálculos aproximados tentativos; en este caso, se deben indicar las gamas de precios. Los cálculos en firme requieren los rendimientos basados en el trabajo de laboratorio o, de preferencia, en la planta piloto.

Mano de obra La mano de obra es el segundo costo en importancia en la manufactura. La mano de obra requerida para un proceso se puede calcular con el estudio del diagrama de flujo del proceso, con atención especial a los pasos primarios del proceso como fraccionamiento, filtración, etc. El salario promedio por hora (o por día en muchos países) debe ser el que paga la empresa. Cuando se ha calculado el número de personas por turno, para un volumen dado de producción, se pueden determinar el costo anual y el costo unitario de la mano de obra.

H. E. Wessel [*Chem. Eng.*, **59**, 209-210 (julio, 1952)] presentó un estudio de los requisitos de mano de obra de la industria química en Estados Unidos así como datos y una curva de horas de mano de obra por tonelada por paso del proceso contra la capacidad de la planta, en toneladas por día. Estos datos se pueden representar mediante:

$$\log_{10} Y = 0.783 \log_{10} \chi + 1.252 + B \qquad (25\text{-}204)$$

en donde Y son las horas de mano de obra por tonelada por paso del proceso, χ es la capacidad de la planta en toneladas por día y B es una constante que tiene valores de 0.132 cuando se utilizan unidades múltiples para aumentar la capacidad o cuando el proceso es todo por lotes, es de cero en una planta promedio y de –0.167 en plantas altamente automatizadas o en donde se procesan fluidos.

Los datos de Wessel para la industria química de Estados Unidos son para toneladas cortas, o sean 907.2 kg o 2000 lb. La mano de obra requerida es mayor en países con productividades más bajas.

El costo aproximado de la supervisión de la mano de obra directa es alrededor de 10% del costo de la mano de obra para operaciones sencillas y de 25% para operaciones complejas.

Servicios generales Incluyen vapor, agua para enfriamiento, agua para proceso, electricidad, combustible, aire comprimido y refrigeración. El consumo de ellos se puede calcular con los balances de materiales y energía para el proceso, junto con el diagrama de flujo del equipo.

Considérese un enfriador de acuerdo con el diagrama de flujo del equipo. La velocidad requerida de disipación de calor se conoce a partir de los balances de materiales y energía y el volumen de agua de enfriamiento se puede calcular después de especificar las temperaturas de entrada y salida de ella. El cálculo del consumo de otros servicios también es sencillo. Se deben agregar tolerancias para desperdicio o pérdidas inevitables.

Cada empresa conoce el costo unitario actual de cada servicio; esto permite calcular el costo anual de todos los servicios y el de ellos por unidad de producción. Este último suele ser mucho menor que los costos de materia prima y mano de obra. Sin embargo, es mucho más complicado calcular los costos de los servicios que los de cualquier otro concepto del costo de manufactura.

No existen métodos abreviados satisfactorios para ello. Cuando los costos de los servicios son pequeños, se pueden determinar en forma aproximada con base en los costos conocidos de otros procesos. También se pueden utilizar los datos publicados de consumo de servicios por unidad de producción en diversos procesos.

Costos directos diversos Los cálculos de costos de mantenimiento y reparaciones, suministros para operaciones y regalías por tecnología y patentes se deben basar en los datos de la empresa para procesos similares. El costo promedio aproximado del mantenimiento es de 6% anual del costo de capital de la planta; puede variar de 2 a 10% según la severidad del funcionamiento de la planta. Más o menos la mitad del costo del mantenimiento es para materiales y la otra mitad para mano de obra. Los costos de regalías y patentes pueden ser entre 1 y 5% del precio de venta del producto.

Costos indirectos de manufactura Los cálculos de beneficios adicionales (prestaciones), laboratorio de control, gastos indirectos generales de la planta, material de empaque e instalaciones de almacenamiento se deben basar en los datos de la empresa para procesos similares.

Los costos de los beneficios adicionales (prestaciones), como pensiones, prima de vacaciones y otras, que son por ley en muchos países, son entre 15 y 20% del costo de la mano de obra. Se requiere trabajo de

laboratorio para control de calidad del producto y su costo es entre 10 y 20% del de la mano de obra.

Los gastos indirectos generales de la planta incluyen seguridad, servicio médico, instalaciones recreativas, para almacenamiento y eliminación de efluentes, etc. En general, cuanto más grande sea la planta menor serán estos gastos por unidad de producción y pueden variar entre 15 y 150% del costo de la mano de obra. Los costos de envases y empaques dependen de la naturaleza física y química del producto, así como de su empleo y su valor. Este costo puede ser hasta de más del 30% del precio de venta para productos de tocador y farmacéuticos.

Cálculos rápidos de costos de manufactura Los costos fijos de manufactura son función de la inversión en capital fijo e independientes del volumen de producción de la planta. El impuesto sobre bienes raíces (predial) varía según la zona y se puede considerar como un 2% del costo del capital fijo de la planta, si no se tienen datos específicos. El costo de los seguros depende de la ubicación y del tipo de materiales y proceso, y por lo general es de 1% del costo del capital fijo.

El costo de manufactura de un producto es la suma del costo de procesamiento o transformación y el costo de la materia prima. El costo de transformación se puede dividir en tres partes: costo relacionado con la inversión, relacionado con la mano de obra y de servicios generales.

En el cargo de gastos indirectos se suele incluir lo siguiente: suministros para operación, supervisión, cargos indirectos a la nómina, protección de la planta, oficinas, gastos indirectos generales de la planta y laboratorio de control. Este cargo se suele calcular como porcentaje del costo de la mano de obra directa.

Este porcentaje se obtiene a partir de los libros de la empresa. Aunque puede variar mucho, una cifra razonable es de 125%. En este caso, el costo relacionado con la mano de obra sería de 2.25 veces el de la mano de obra directa. En un turno que trabaje 6000 h anuales con N personas y que tenga un salario de $\$c_L$ por hora, el costo anual relacionado con la mano de obra sería de 13 500 (c_LN).

Considérese una planta con un costo de capital fijo, C_{FC}. Si el impuesto predial anual es de 0.02 C_{FC}, el seguro es de 0.01 C_{FC} y el mantenimiento es 0.06 C_{FC}, el costo anual relacionado con la inversión sería de 0.09 C_{FC}. El costo anual de los servicios es A_U. El costo anual de transformación, A_p, se puede representar con:

$$A_p = \eta_1 C_{FC} + \eta_2 c_L N + A_U \qquad (25\text{-}205)$$

en donde los factores η_1 y η_2 se pueden obtener con los datos de la empresa y tienen las dimensiones de año^{-1} y de horas por año, respectivamente.

Al sustituir la información dada antes en la ecuación (25-205) se obtiene la relación

$$A_p = 0.09C_{FC} + 13{,}500c_L N + A_U \qquad (25\text{-}206)$$

La ecuación (25-206) representa muy de cerca los costos de manufactura de la empresa y es típica de los coeficientes que se pueden esperar.

El costo anual de transformación, A_{p2}, en una planta similar de diferente tamaño, diseñada para un volumen anual de producción R_2, se puede calcular en forma aproximada con la ecuación

$$A_{P2} = \eta_1 C_{FC1}(R_2/R_1)^{0.7} + \eta_2 c_L N_1 (R_2/R_1)^{0.25} + A_{U1}(R_2/R_1) \qquad (25\text{-}207)$$

(F. A. Holland, F. A. Watson y J. K. Wilkinson, *Introduction to Process Economics*, Wiley, London y New York, 1974, p. 152).

El costo de transformación por unidad de producción de una planta con volumen anual de producción, R_2, se puede calcular en forma aproximada con la ecuación

$$\frac{A_{P2}}{R_2} = \frac{100}{R_2}\left[\eta_1 C_{FC}\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{0.7} + \eta_2 c_L N_1\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{0.25} + A_{U1}\left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right] \qquad (25\text{-}208)$$

en donde A_{p2}/R_2 es en centavos por kilogramo.

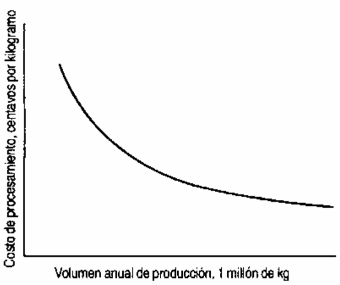


FIG. 25-40 Reducción en el costo de procesamiento en función del aumento en el tamaño de la planta.

La ecuación (25-208) se puede emplear para calcular datos para curvas como la de la figura 25-40, que indica la disminución en el costo de transformación por unidad de producción, A_{p2}/R_2, cuando aumenta el tamaño de la planta.

Costo de manufactura como base para la fijación del precio del producto La fijación de precios sobre la base del costo más una utilidad razonable tiene la desventaja de que no tiene en cuenta la demanda. En la actualidad, se fijan los precios sobre la base de investigación de mercados. De todos modos, el método clásico de costo más utilidad puede proporcionar información complementaria útil y se puede aplicar en cualquiera de estos métodos.

1. Fijación de precios por absorción
2. Fijación de precios por tasa de rendimiento
3. Fijación de precios marginal

La utilidad bruta anual, A_{GP}, de un producto se expresa con

$$A_{GP} = A_S - A_{ME} - A_{BD} \qquad (25\text{-}6)$$

en donde A_S es el ingreso por ventas anuales, A_{ME} es el costo anual de manufactura y A_{BD} el cargo anual por depreciación en el balance.

La ecuación (25-6) se puede escribir también en la forma de

$$A_S = A_{GP} + A_{VME} + A_{FME} + A_{BD} \qquad (25\text{-}209)$$

en donde A_{VME} y A_{FME} son los costos anuales variables y fijos de manufactura.

La ecuación (25-209) se puede reescribir también como

$$c_S = c_{VME} + (A_{GP}/R) + (A_{FME} + A_{BD})/R \qquad (25\text{-}210)$$

en donde R es el volumen anual de ventas considerado como igual que el volumen anual de producción, c_S es el precio de venta por unidad de producción y c_{VME} es el costo variable de manufactura por unidad de producción.

La fijación de precios por absorción se basa en un volumen anual normal de producción R. La utilidad bruta por unidad, A_{GP}/R, se considera como porcentaje fijo χ de los costos fijos y variables de manufactura dados por la ecuación

$$\frac{A_{GP}}{R} = \left(\frac{\chi}{100}\right)\left[c_{VME} + \left(\frac{A_{FME} + A_{BD}}{R}\right)\right] \qquad (25\text{-}211)$$

Se combinan las ecuaciones (25-210) y (25-211) para dar

$$c_S = \left(\frac{100 + \chi}{100}\right)\left[c_{VME} + \left(\frac{A_{FME} + A_{BD}}{R}\right)\right] \qquad (25\text{-}212)$$

Las ecuaciones (25-210), (25-211) y (25-212) están basadas en un volumen anual fijo de producción normal R.

Considérese un cambio en el volumen anual de producción a $R + \Delta R$. Para mantener la utilidad bruta por unidad en A_{GP}/R, el precio de venta por unidad de producción necesitaría ser $c_S - \Delta c_S$. En este caso, la ecuación (25-210) se puede escribir en la forma modificada

TABLA 25-37 Variaciones

Ingresos por ventas $Rc_S - R^* c_S^*$	=	Precio de venta $R(c_S - c_S^*)$	+	Volumen de ventas $c_S^*(R - R^*)$		
Utilidad $Rc_{NP} - R^* c_{NP}^*$	=	Utilidad por unidad $R(c_{NP} - c_{NP}^*)$	+	Cantidad $c_{NP}^*(R - R^*)$		
Costo total $Rc_{TE} - R^* c_{TE}^*$	=	Costo por unidad $R(c_{TE} - c_{TE}^*)$	+	Volumen de producción $c_{TE}^*(R - R^*)$		
Costo de materiales directos $Rc_{RM} - R^* c_{RM}^*$	=	Precio del material $R(c_{RM} - c_{RM}^*)$	+	Uso de materiales $c_{RM}^*(R - R^*)$		
Costo de mano de obra directa $\theta c_L = \theta^* c_L^*$	=	Salarios $\theta(c_L - c_L^*)$	+	Eficiencia de mano de obra $c_L^*(\theta - \theta^*)$		
Costo indirecto $C_{OH} - \theta^* c_{NOH}^*$	=	Costo presupuestado $(C_{OH} - \theta c_{BOH})$	+	Volumen $\theta(c_{BOH} - c_{NOH}^*)$	+	Eficiencia $c_{NOH}^*(\theta - \theta^*)$

c_{BOH} = Costo indirecto presupuestado flexible, \$/h.
c_L = Costo real de mano de obra, \$/h.
c_{NOH}^* = Costo indirecto estándar basado en volumen normal de producción, \$/h.
c_{NP} = Utilidad neta real antes de impuestos, \$/unidad.
C_{OH} = Costo indirecto real, \$/periodo.
c_{RM} = Costo real de materia prima, \$/unidad.
c_S = Precio de venta real, \$/unidad.
c_{TE} = Costo total real, \$/unidad.
R = Cantidad real, unidades/periodo.
R^* = Cantidad estándar, unidades/periodo.
θ = Tiempo real para producir una cantidad dada, h.
θ^* = Tiempo estándar para producir una cantidad dada, h.
$c_{NP} = c_S - c_{TE}$.
NOTA: El asterisco en todos los conceptos no señalados con un símbolo, indica el costo estándar de ese concepto.

$$c_S - \Delta c_S = c_{VME} + (A_{GP}/R) + [(A_{FME} + A_{BD})/(R + \Delta R)] \quad (25\text{-}213)$$

Se resta la ecuación (25-213) de la ecuación (25-210) para dar

$$\Delta c_S = \frac{\Delta R}{R}\left(\frac{A_{FME} + A_{BD}}{R + \Delta R}\right) \quad (25\text{-}214)$$

La ecuación (25-214) indica el sobreprecio Δc_S por unidad de producción para un aumento ΔR en el volumen anual de producción. Esta ecuación indica también la baja de precio Δc_S por unidad de producción con una reducción ΔR en el volumen anual. En el primer caso se dice que hay sobreabsorción de costos fijos o indirectos y, en el segundo, que hay subabsorción.

La fijación de precios por absorción es rígida y arbitraria y puede ocasionar que se rechace una operación si el precio de venta fijado c_S no se puede obtener, aunque esa operación tenga una buena aportación a los costos fijos.

La fijación de precios por tasa de rendimiento es una forma modificada de la fijación por absorción y está basada en la ecuación

$$\frac{A_{GP}}{A_{ME}} = \left(\frac{C_{TC}}{A_{ME}}\right)\left(\frac{A_{GP}}{C_{TC}}\right) \quad (25\text{-}215)$$

en donde C_{TC} es el capital total empleado; la ecuación (23-125) también se puede escribir como:

Porcentaje de recargo sobre el costo
= (relación de rotación de capital)(tasa proyectada de rendimiento sobre el capital)

El porcentaje de recargo (o de utilidad) sobre el costo se calcula a partir de una relación conocida de rotación de capital y una tasa deseada de retorno o rendimiento sobre el capital. Igual que con la fijación de precios por absorción, el porcentaje de recargo sobre el costo de manufactura por unidad de producción se calcula para un volumen anual normal de producción. Si se excede de ese volumen, la tasa de rendimiento sobre el capital será mayor que la proyectada debido a la disminución en el costo unitario; a la inversa, si el volumen es menor que el normal, la tasa de rendimiento será más baja que la proyectada por el aumento en el costo unitario. Con volúmenes de producción mayor y menor que el normal, el porcentaje de recargo se basa en el costo unitario normal. Por tanto, este método sólo es válido para el volumen normal de producción.

Con fijación de precios marginal, la empresa selecciona sus precios de venta para maximizar la aportación total $\Sigma R(c_S - c_{VME})$ de sus diversos productos. Este método es muy útil en empresas grandes y con productos múltiples, porque es el costo marginal el que se debe considerar como base para competir con otras empresas. El precio mínimo aceptable de un producto es el que tiene la mínima aportación posible a los costos fijos. La fijación de precios marginal permite a una empresa establecer precios más competitivos que cuando utiliza los sistemas de absorción o de tasa de rendimiento.

La fijación de precios por absorción, tasa de rendimiento y marginal se han descrito sobre la base del costo de manufactura. El costo total, que es la suma de costos de manufactura y generales, se ha considerado también como base. En este caso, la utilidad anual en que se debe pensar es la neta en vez de la bruta.

Costos estándar para control presupuestario Para conveniencia y sencillez, se considerará que el costo total de un producto manufacturado es la suma de costos de material, mano de obra e indirectos. Los costos estándar son los que se determinan y presupuestan para la manufactura de una cantidad dada de producto en un tiempo dado. La desviación entre los costos reales y los costos estándar se llama variación o cambio. Es más fácil hacer comparaciones entre periodos con el empleo de las variaciones que con datos reales de producción. En la tabla 25-37 se presentan las diferentes variaciones en los costos de material, mano de obra e indirectos.

El sistema de costeo estándar se utiliza mucho en los sistemas de control presupuestario. Los criterios para el establecimiento de los estándares (normas) van desde los máximos posibles en condiciones ideales hasta los esperados en condiciones normales. Los costos del pasado e históricos no siempre son la mejor base para establecer costos estándar, porque el rendimiento en el pasado puede haber sido ineficiente.

Presupuestos estáticos y flexibles Los costos indirectos pueden tener gran influencia en la rentabilidad de un proyecto y son los únicos

TABLA 25-38 Presupuesto flexible para costos indirectos

Costo indirecto, $/mes	Producción: 1 millón de kg/mes				
	8	9	10	11	12
Fijos	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Variables	40 000	45 000	50 000	55 000	60 000
Semivariables	40 000	40 000	60 000	60 000	90 000
Total	120 000	125 000	150 000	155 000	190 000

que están fuera del control del gerente del proyecto. Se espera que el proyecto aporte una suma definida para los gastos de la empresa y se le cargarán esos gastos aunque haya cero producción. Son el componente fijo del costo indirecto e incluirán costos que se asignan o prorratean en forma directa como la depreciación y una parte de los costos generales, como sueldos de oficina y aire acondicionado.

Otros costos que no son de producción, como la mano de obra indirecta, pueden tener variación lineal según el volumen de producción y representan el componente variable de los gastos indirectos. Los costos que no son fijos ni variables pero que ocurren en etapas discretas con los diversos volúmenes de producción, como la supervisión de obreros, son el componente semivariable del costo indirecto. Es muy fácil determinar estos componentes para diversos volúmenes de producción y presentarlos como se indica en la tabla 25-38.

En la actualidad se utilizan dos tipos de presupuesto para gastos indirectos. El costo presupuestado de los indirectos llamado fijo (a veces estático) está en relación con el volumen estándar de producción presupuestado. El costo presupuestado flexible de indirectos es el que aparece como costo total en la tabla 25-38. Los valores para volúmenes intermedios de producción se obtienen a menudo por interpolación. Esto sólo se justifica cuando los costos semivariables son una parte insignificante de los costos indirectos.

Los presupuestos flexibles se utilizan más que los estáticos, a pesar de ciertas dificultades lógicas. Esto se debe a que la producción, en muchos casos, es por temporada y si se emplea una norma de producción estática puede deformar la evaluación del rendimiento. Las variaciones son la diferencia entre los costos reales desembolsados y los presupuestados. La variación es desfavorable si es positiva y favorable si es negativa. Cualquier variación se debe explicar y, si es necesario, controlarla; la variación más grande es la primera que se debe tomar en cuenta.

Consúltense los datos de costos indirectos de la tabla 25-38, con un volumen estándar de producción de 10 millones de kg mensuales. Entonces, los costos indirectos estáticos presupuestados son de $150 000 mensuales, o sea, 1.5 centavos por kilogramo. Se supone que los gastos indirectos reales son de $186 000 en un mes en que se produjeron 12 millones de kg. Entonces, el costo presupuestado estático de los indirectos sería de 12 millones (0.015) = $180 000 mensuales. Por tanto, la variación es de $186 000 − $180 000 = +$6000, que es desfavorable, pues son $6000 más de lo previsto.

En la tabla 25-38 se ve que el costo presupuestado flexible de los indirectos para una producción de 12 millones de kg mensuales es de $190 000. La varianza correspondiente es $186 000 − $190 000, o sea, −$4000, que es favorable porque ese dinero se gastó de menos que lo previsto. Entonces, el empleo de presupuestos flexibles hace que este rendimiento sea mejor, sin cambiar ni el volumen de producción ni un solo costo del presupuesto.

La hora estándar La hora estándar es el número de unidades de producto que se puede esperar producir en una hora. A menudo, se utiliza como medida del volumen de producción en la contabilidad de costos.

Considérese un proceso por lotes, en el que se puede producir 1000 kg del producto A en un ciclo de 5 horas o 900 kg del producto B en un ciclo de 3 horas. Por tanto, en esta sección del proceso la hora estándar es 200 kg del producto A o 300 kg del producto B. En un periodo presupuestario de, por ejemplo, 1000 h, es posible manufacturar 200 000 kg del producto A o 300 000 kg del producto B o cualquier combinación conveniente de ellos.

Supóngase, por ejemplo, que los requisitos de producción son el doble para el producto A que para el producto B, es decir, una relación de 600 kg o 3 horas estándar para el producto A contra 300 kg o 1 hora estándar para el producto B. Sobre esta base, para un periodo presupuestario de 1000 h, se emplearían 750 horas estándar [(3/4)1000] para producir 750(200) = 150 000 kg de producto A y se emplearían 250 horas estándar [(1/4)1000] para producir 250(300) = 75 000 kg del producto B.

La eficiencia de producción, P_e, se puede calcular con

$$P_e = (P_s/P_a)100 \qquad (25\text{-}216)$$

en donde P_s es el volumen real de producción en horas estándar y P_a son las horas reales trabajadas.

El grado de actividad de producción P_ℓ se puede calcular con

$$P_\ell = (P_s/P_b)100 \qquad (25\text{-}217)$$

en donde P_b es la producción presupuestada en horas estándar.

La desviación de la capacidad presupuestada, b_c, se puede calcular mediante

$$b_c = (P_a/P_w)100 \qquad (25\text{-}218)$$

en donde P_w es el número presupuestado de horas de trabajo.

Costos reales contra costos estándar Considérese los datos de ventas, utilidades y costos de manufactura en la tabla 25-39. La utilidad bruta de $33 129 por periodo es mejor que la esperada. Entonces hay menos incentivo para investigar los costos totales cuando la variación en las utilidades es favorable que si la utilidad fuera menor a la esperada. Sin embargo, el costeo estándar permite hacer un análisis objetivo de los datos, sean buenos o malos.

Las variaciones individuales en la tabla 25-39 indican que el aumento en la utilidad se debe a la reducción en los costos de materiales, los cuales influyen en los costos de manufactura en mayor grado que los aumentos en costos de mano de obra e indirectos. Las variaciones individuales también indican que, en su mayor parte, el aumento en las utilidades se debe a un incremento en los ingresos por ventas.

Por supuesto, la administración querrá investigar los costos de mano de obra e indirectos para ver si hay ineficiencias y aseverar las razones del incremento en el ingreso por ventas. Si es necesario, se pueden modificar los valores estándar.

Se puede ver que la utilidad es la diferencia entre dos sumas grandes de efectivo y que las variaciones de alrededor de 3% en el costo de manufactura y en los ingresos por ventas han ocasionado una variación de 33% en la utilidad bruta.

TABLA 25-39 Ventas, utilidades y costos de manufactura

Componente	Real, $/periodo	Estándar, $/periodo	Variación, $/periodo
Costo de materiales directos	325 080	350 000	−24 920
Costo de mano de obra directa	55 001	51 600	+ 3 401
Costo indirecto	75 000	68 370	+ 6 630
Costo de manufactura	455 081	469 970	−14 889
Ingreso por ventas	588 240	570 000	+18 240
Utilidad bruta	133 159	100 030	+33 129

TABLA 25-40 Datos de costos para los problemas

Factor	Valor real	Valor estándar
Costo de materia prima, $/unidad	$c_{RM} = 0.18$	$c^{\circ}_{RM} = 0.20$
Costo mano de obra directa, $/unidad	$c_L = 8.45$	$c^{\circ}_L = 8.00$
Volumen de producción, unidad/periodo	$R = 1{,}806{,}000$	$R^{\circ} = 1{,}750{,}000$
Tiempo de producción, h/periodo	$\theta = 6509$	$\theta^{\circ}_N = 6250$
Costos indirectos fijos y semivariables, $/periodo	. . . .	$C^{\circ}_{FOH} = 60{,}000$
Costo indirecto variable, $/h	. . . .	$C^{\circ}_{VOH} = 1.00$
Costo indirecto, $/periodo	$C_{OH} = 75{,}000$	

roducción son el do-
ecir, una relación de
itra 300 kg o 1 hora
a un periodo presu-
dar [(3/4)1000] para
se emplearían 250
0) = 75 000 kg del

lar con

(25-216)

horas estándar y P_a

calcular con

(25-217)

ras estándar.
se puede calcular

(25-218)

de trabajo.
dérese los datos de
bla 25-39. La utili-
esperada. Entonces
les cuando la varia-
ad fuera menor a la
te hacer un análisis

dican que el aumen-
s de materiales, los
nayor grado que los
Las variaciones in-
e, el aumento en las
por ventas.
r los costos de mano
aseverar las razones
ecesario, se pueden

dos sumas grandes
3% en el costo de
onado una variación

de manufactura

stándar, periodo	Variación, $/periodo
350 000	−24 920
51 600	+ 3 401
68 370	+ 6 630
469 970	−14 889
570 000	+18 240
100 030	+33 129

roblemas

	Valor estándar
	$c^{\circ}_{RM} = 0.20$
	$c^{\circ}_L = 8.00$
0	$R^{\circ} = 1,750,000$
	$\theta^{\circ}_N = 6250$
	$C^{\circ}_{FOH} = 60,000$
	$C^{\circ}_{VOH} = 1.00$
0	

La tabla 25-39 está muy simplificada. En un sistema de costos estándar, las variaciones en el material directo, mano de obra directa y gastos indirectos, se desglosan en componentes para permitir un estudio más detallado de las operaciones. El costeo estándar es una valiosísima herramienta de control para la administración.

Variaciones: Costo de material directo Dado que el cambio o variación en el costo del material directo $\Delta(Rc_{RM})$ es la diferencia entre el costo real y el costo estándar, entonces

$$\Delta\,(Rc_{RM}) = Rc_{RM} - R^{\circ}c^{\circ}_{RM} \qquad (25\text{-}219)$$

en donde R es la cantidad real y R° es la cantidad estándar de unidades por periodo, c_{RM} es el precio real y c°_{RM} es el precio estándar, en $ por unidad.

La ecuación (25-219) se puede escribir en forma ampliada:

$$\Delta\,(Rc_{RM}) = R(c_{RM} - c^{\circ}_{RM}) + c^{\circ}_{RM}(R - R^{\circ}) \qquad (25\text{-}220)$$

en donde $R(c_{RM} - c^{\circ}_{RM})$ llamada variación en el precio del material directo, es la cantidad real multiplicada por la desviación en el precio unitario y $c^{\circ}_{RM}\,(R - R^{\circ})$, llamada variación en el empleo de material directo, es el precio unitario estándar multiplicado por la desviación en la cantidad.

Calcúlense, con los datos de la tabla 25-40, el costo del material directo y el costo estándar del material directo como:

$$Rc_{RM} = 1\,806\,000(0.18) = \$325\,080 \text{ por periodo}$$

$$R^{\circ}\,c^{\circ}_{RM} = 1\,750\,000(0.20) = \$350\,000 \text{ por periodo}$$

Con la ecuación (25-219) se calcula que la variación en el costo del material directo es de −$24 920 por periodo y es favorable. Sin embargo, con la ecuación (25-220) se calcula una variación en el precio del material directo de (1 806 000)(0.18 − 0.20) = −$36 120 por periodo, que es favorable. También se calcula una variación en el empleo de material directo de (0.20)(1 806 000 − 1 750 000) = $11 200 por periodo, que es desfavorable.

En este caso, la variación favorable en el costo del material directo se logró debido a un menor precio unitario, a pesar del empleo ineficiente de los materiales, que se debe investigar. (No se debe tener complacencia porque el precio unitario más bajo bien podría ser temporal.)

En el caso de mezclas de materia prima, la variación en el empleo del material directo se puede subdividir, además, en **1)** variación en la mezcla de material directo y **2)** variación en el rendimiento del material directo. La primera es la diferencia entre las composiciones real y estándar de la mezcla y la segunda es la diferencia entre los rendimientos real y estándar. El rendimiento estándar es el producto esperado con el insumo estándar de material. La variación en el rendimiento indica el grado de pérdida de materia. La variación en la mezcla de material directo se explica en el ejemplo 22.

Ejemplo 22 Una mezcla estándar de 100 unidades de material incluye 70% de material A a $0.08 por unidad y 30% de material B a $0.12 por unidad. El costo de la mezcla estándar es 70(0.08) + 30(0.12) = $9.20.

Considérese ahora una mezcla de 100 unidades que incluye 75% de material A y 25% de material B. El costo de esta mezcla a los precios estándar es 75(0.08) + 25(0.12) = $9.00. La variación en la mezcla de material directo es $9.00 − $9.20 = −$0.20 y es favorable; ésta se ha logrado con el empleo de más material A de precio bajo y menos material B de precio alto.

La variación en el rendimiento del material directo se ilustra como sigue. Supóngase que la mezcla estándar (costo $9.20 por 100 unidades) tiene una pérdida estándar de 20% lo cual hace que el costo sea $9.20 por 80 unidades o $0.115 por unidad de producto. Considérese ahora que la pérdida real es de 30% y quedan 70 unidades de producto por cada 100 unidades de insumo. La variación en el rendimiento del material directo es 0.115(80 − 70) = $1.15 y es desfavorable.

Variaciones: costo de la mano de obra directa Dado que la variación o cambio en el costo de la mano de obra directa, $\Delta(\theta c_L)$, es la diferencia entre el costo real y el costo estándar, entonces

$$\Delta\,(\theta c_L) = \theta c_L - \theta^{\circ}c^{\circ}_L \qquad (25\text{-}221)$$

en donde c_L es el salario real, $ por hora, c°_L es el salario estándar $ por hora, θ es el tiempo real para producir una cantidad dada del producto en un periodo dado, horas, y θ° es el tiempo estándar para producir una cantidad dada del producto en un periodo dado, horas.

La ecuación (25-221) también se puede escribir en forma ampliada como

$$\Delta\,(\theta c_L) = \theta(c_L - c^{\circ}_L) + c^{\circ}_L(\theta - \theta^{\circ}) \qquad (25\text{-}222)$$

en donde $\theta(c_L - c^{\circ}_L)$, es la variación en el salario directo, o sea, el tiempo real requerido para producir un volumen dado multiplicado por la diferencia en el salario y $c^{\circ}_L(\theta - \theta^{\circ})$, que es la variación en la eficiencia de la mano de obra directa, es el salario estándar multiplicado por la desviación en el tiempo requerido para producir un volumen dado.

Con el empleo de los datos de la tabla 25-40, se calcula que una hora estándar corresponde a:

$$(1\,750\,000/6250) = 280 \text{ unidades por hora estándar}$$

El tiempo estándar para la producción real es

$$\theta^{\circ} = (1\,806\,000/280) = 6450 \text{ horas estándar por periodo}$$

El costo de la mano de obra directa es:

$$\theta c_L = 6509(8.45) = \$55\,001 \text{ por periodo}$$

El costo estándar de la mano de obra directa es:

$$\theta^{\circ}\,c^{\circ}_L = 6450(8.00) = \$51\,600 \text{ por periodo}$$

Con la ecuación (25-219) se calcula que la variación en el costo de la mano de obra directa es $3401 por periodo y es desfavorable. Sin embargo, con la ecuación (25-220) se calcula una variación en el salario directo de $\theta(c_L - c^{\circ}_L)$ = 6509(8.45 − 8.00) = $2929 por periodo, que es desfavorable. También se calcula la variación en la eficiencia de la mano de obra directa como $c^{\circ}_L(\theta - \theta^{\circ})$ = 8.00(6509 − 6450) = $472 por periodo, que también es desfavorable.

En este ejemplo, la variación desfavorable de $3401 en el costo de la mano de obra directa, se debe tanto a salarios más altos por hora y un mayor número de horas de mano de obra.

Si es necesario, la variación en el costo de mano de obra directa se puede desglosar en una variación en el tiempo ocioso de la mano de obra además de las variaciones en los salarios y en la eficiencia de la mano de obra directa. La variación en el tiempo ocioso o perdido de la mano de obra es sólo el número de horas perdidas en el periodo multiplicadas por el salario estándar. Esto rara vez es pertinente para las plantas de proceso, excepto cuando se trata del mantenimiento.

Variaciones: costo indirecto La variación en el costo indirecto, ΔC_{OH} es la diferencia entre el costo indirecto real y el costo indirecto estándar estático o fijo:

$$\Delta C_{OH} = C_{OH} - \theta^{\circ}c^{\circ}_{NOH} \qquad (25\text{-}223)$$

en donde C_{OH} es el costo indirecto real en un periodo dado, en $ por periodo, c°_{NOH} es el costo indirecto estándar fijo basado en el volumen normal de producción, $ por hora, θ es el tiempo real para fabricar una cantidad dada de producto en un periodo determinado y θ° es el tiempo estándar para fabricar una cantidad dada de producto en un periodo determinado, horas.

La ecuación (25-223) también se puede escribir en la forma ampliada

$$\Delta C_{OH} = (C_{OH} - \theta c_{BOH}) + \theta(c_{BOH} - c^{\circ}_{NOH}) + c^{\circ}_{NOH}\,(\theta - \theta^{\circ}) \qquad (25\text{-}224)$$

en donde c_{BOH} es el costo indirecto presupuestado flexible con el volumen o capacidad real de producción.

En la ecuación (25-233), $(C_{OH} - \theta c_{BOH})$ es la variación en el costo indirecto presupuestado, $\theta(c_{BOH} - c^{\circ}_{NOH})$ es la variación del volumen de costo indirecto y $c^{\circ}_{NOH}(\theta - \theta^{\circ})$ es la variación en la eficiencia total. Esta última es análoga a la variación en la eficiencia de la mano de obra y es el producto de los gastos indirectos estándar multiplicados por la desviación en el tiempo requerido para fabricar un volumen dado.

También en la ecuación (25-224), c_{BOH} es el costo indirecto presupuestado flexible, en $ por hora, para el volumen real de producción y la variación en el volumen de costo indirecto $\theta(c_{BOH} - c^{\circ}_{NOH})$ es el tiempo real para producir un volumen dado multiplicado por la diferencia entre el costo indirecto presupuestado flexible y el costo indirecto estándar, en $ por hora. La variación en el costo indirecto presupuestado $(C_{OH} - \theta c_{BOH})$ es la diferencia entre el costo indirecto real y el tiempo real, en horas, para producir el volumen dado, multiplicado por el costo indirecto presupuestado flexible, en $ por hora.

Se escribirá el costo indirecto fijo para el periodo presupuestado como C°_{FOH} el costo indirecto semivariable como C°_{SVOH}, y las horas estándar para lograr la producción normal como θ°_N. Entonces, el costo indirecto estándar con la producción normal se puede calcular mediante

$$c^{\circ}_{NOH} = [(C^{\circ}_{FOH} + C^{\circ}_{SVOH})/\theta^{\circ}_N] + c^{\circ}_{VOH} \qquad (25\text{-}225)$$

en donde c°_{VOH} es el costo indirecto variable estándar, $ por hora.

Para volúmenes de producción distintos al normal, el costo indirecto presupuestado flexible se expresa con

$$c_{BOH} = [(C^{\circ}_{FOH} + C^{\circ}_{SVOH})/\theta] + c^{\circ}_{VOH} \qquad (25\text{-}226)$$

en donde θ son las horas reales para fabricar una cantidad dada del producto.

Para volúmenes de producción menores que el normal, se subutilizan los costos indirectos fijos y el costo indirecto presupuestado flexible c_{BOH} es mayor que el costo indirecto estándar c°_{NOH}. Con volúmenes superiores al normal, c_{BOH} es menor que c°_{NOH}.

En la contabilidad de costos se acostumbra considerar al costo estándar semivariable, C°_{SVOH}, con el volumen estándar de producción, como parte del costo fijo estándar. En este caso, las ecuaciones (25-225) y (25-226) se pueden escribir como:

$$c^{\circ}_{NOH} = (C^{\circ}_{FOH}/\theta^{\circ}_N) + c^{\circ}_{VOH} \qquad (25\text{-}227)$$

$$c_{BOH} = (C^{\circ}_{FOH}/\theta) + c^{\circ}_{VOH} \qquad (25\text{-}228)$$

Con el empleo de los datos de la tabla 25-40 en la ecuación (25-227), se calcula que el costo indirecto estándar es

$$c^{\circ}_{NOH} = (60{,}000/6250) + 1.00 = \$10.60/\text{h}$$

Con la ecuación (25-228) y los datos de la tabla 25-40 se calcula que el costo indirecto presupuestado flexible es:

$$c_{BOH} = (60{,}000/6509) + 1.00 = \$10.22/\text{h}$$

Al sustituir en la ecuación (25-223) se calcula la variación en el costo indirecto:

$$\Delta c_{OH} = 75{,}000 - 6450(10.60) = \$6630$$

Esta variación es desfavorable. (Téngase en cuenta que el tiempo estándar para la producción real se había calculado en 6450 h por periodo.)

La variación en el costo indirecto incluye: **1)** variación en el costo indirecto presupuestado, **2)** variación en el volumen indirecto y **3)** variación en la eficiencia del costo indirecto. A continuación aparece el cálculo de cada uno

$$c_{OH} - \theta c_{BOH} = 75{,}000 - 6509(10.22) = \$8478$$

La variación en el costo indirecto presupuestado es positiva y, por tanto, desfavorable

$$\theta(c_{BOH} - c^{\circ}_{NOH}) = 6509(10.22 - 10.60) = -\$2473$$

La variación en el volumen de indirectos es negativa y favorable:

$$c^{\circ}_{NOH}(\theta - \theta^{\circ}) = 10.60(6509 - 6450) = \$625$$

La variación en la eficiencia del costo indirecto es positiva y desfavorable.

Las variaciones totales de cada categoría aparecen en la tabla 25-39.

Los ingenieros químicos suelen hacer evaluaciones detalladas de costos en vez de utilidades o ventas. Sin embargo, estas últimas se pueden analizar en forma similar a los costos con las ecuaciones de la tabla 25-37. Para este fin se invertirán la convención de los signos, porque un aumento en ventas o utilidades sería favorable, mientras que un aumento en costos se consideraría desfavorable. Esas ecuaciones se pueden aplicar a procesos por lotes y continuos.

Los presupuestos se pueden utilizar para planeación a futuro y para control. Las variaciones indican a los administradores cuáles deberían haber sido los costos y lo cerca que estuvieron de cumplir con los valores presupuestados. Los administradores podrán evaluar, para cierto número de periodos presupuestarios, la proporción de mejora en el rendimiento en su área de responsabilidad. Un buen sistema presupuestario no sólo dará información detallada y una evaluación del rendimiento sino que también deberá motivar al personal a mejorar su rendimiento.

Análisis de las aportaciones El análisis de la aportación o contribución se puede utilizar para evaluaciones rápidas del efecto de los cambios en los costos de manufactura sobre la rentabilidad. Se puede definir una eficiencia de la aportación η adimensional al reescribir la ecuación (25-12) en la forma de

$$\eta = \frac{R(c_S - c_{VE}) - A_{FE}}{R(c_S - c_{VE})} \qquad (25\text{-}229)$$

[F. A. Holland y F. A. Watson, *Eng. Process Econ.*, **1**, 135-143 (1976)].

Esto representa la relación entre la utilidad neta anual A_{NP}, que se obtiene al dividirla entre la utilidad que se podría obtener al no tener que amortizar capital o pagar intereses y si todas las partidas de gastos fijos no se hubieran cargado al proyecto. La eficiencia de la aportación η es también la utilidad por unidad de aportación. Un valor de η de unidad se podría obtener con un alto volumen de producción R, sin que importe si c_S es mayor o menor que c_{VE}. Para el caso inusitado de que c_S sea igual a c_{VE}, el valor de η se volvería negativamente infinito con gastos fijos anuales A_{FE} finitos o, positivamente infinitos si A_{FE} se volvieran negativos por un subsidio excesivo a los gastos. Sin embargo, en casi todos los proyectos que se pretende cubran sus gastos e impuestos, A_{NP} debe ser positivo y, entonces, c_S suele ser mayor que c_{VE}, por lo cual η tendrá valores entre cero y unidad. En los proyectos que no se pretende produzcan utilidades sino que se han creado por su valor social o recreativo, el objetivo debe ser que el valor de η sea lo más cercano a cero que se pueda.

El volumen de producción de punto de equilibrio R_B se define por la ecuación (25-13) como el volumen de producción con el cual el proyecto no gana ni pierde. Se pueden combinar las ecuaciones (25-13) y (25-229) para dar

$$\eta = (R - R_B)/R \qquad (25\text{-}230)$$

que indica que la eficiencia de la aportación η es función del volumen de producción R y que tiene un valor de cero cuando dicho volumen es el de punto de equilibrio R_B. En todos los proyectos reales, R_B será positivamente finito mientras que R no puede ser menor de cero; por tanto, η en la práctica va de infinito negativo (–) hasta la unidad.

A primera vista parecería que es deseable tener un valor de η lo más cercano posible a la unidad, aunque no por necesidad es así. Al con-

sultar la ecuación (2
c_{VE}) es positiva, com
un valor de unidad p
insignificante de gast
ción anual $R(c_S - c_{VE}$
esto será atractivo pa
de capital, y si los ga
al mercado muchos c
petencia suele ser u
c_S. Los precios de lo
vieron un pronuncia
mercado.

Ya que los gastos
nición son independ
aportación unitaria (
una empresa muy gr
fuerte y estable con u
elevados, que disua
abatir el precio de v
bién es independien
ocurrirá en muchos
nan entre muchos p
puede ajustar sus pr
el extremo opuesto,
de hacer esos ajuste

Resulta interesan
productividad sobre
de obra, históricam
que implica que si l
también se duplica
destajo, aunque no s
reducir la fuerza de
tampoco reclutar y
general, es preferib
cualquier parte de l
nal a la producción
bido a este factor lo
nes con el volumen
equilibrio constará
supondrá que un ca
implica un cambio
un aumento en la p
obra, sin que cambi
original de producc
tividad, en una frac

en donde ΔR es el
ción. Al sustituir e
en las utilidades se

$A_{NP} + \Delta A$

Se resta A_{NP} de la

ΔA_{NP}

Se ve por las ecua

Entonces, un cam
un aumento de 10
grande en ellas cu
to en la productivi

En la ecuación
tácticas de "ir des

;) = $8478
es positiva y, por tan-
) = −$2473
tiva y favorable:
i) = $625
:s positiva y desfavo-
en en la tabla 25-39.
iciones detalladas de
, estas últimas se pue-
:cuaciones de la tabla
de los signos, porque
ble, mientras que un
:. Esas ecuaciones se
:ación a futuro y para
dores cuáles deberían
le cumplir con los va-
in evaluar, para cierto
ción de mejora en el
i buen sistema presu-
ia evaluación del ren-
iersonal a mejorar su
la aportación o contri-
idas del efecto de los
entabilidad. Se puede
isional al reescribir la

(25-229)

i., 1, 135-143 (1976)].
ieta anual A_{NP}, que se
ría obtener al no tener
i las partidas de gastos
iencia de la aportación
ión. Un valor de η de
producción R, sin que
caso inusitado de que
tivamente infinito con
infinitos si A_{FE} se vol-
i gastos. Sin embargo,
in sus gastos e impues-
ier mayor que c_{VE}, por
os proyectos que no se
:reado por su valor so-
or de η sea lo más cer-
)rio R_B se define por la
ión con el cual el pro-
s ecuaciones (25-13) y

(25-230)

s función del volumen
indo dicho volumen es
yectos reales, R_B será
ier menor de cero; por
) hasta la unidad.
er un valor de η lo más
:esidad es así. Al con-

sultar la ecuación (25-227) se verá que si la aportación unitaria ($c_S - c_{VE}$) es positiva, como debe ser si el proyecto ha de producir utilidades, un valor de unidad para la eficiencia de aportación η implica un valor insignificante de gastos fijos anuales A_{FE} al compararlo con la aportación anual $R(c_S - c_{VE})$. En los casos en que $R(c_S - c_{VE})$ es muy grande, esto será atractivo para la competencia a pesar de los elevados cargos de capital, y si los gastos fijos son muy bajos, se facilitará que entren al mercado muchos competidores pequeños. El resultado de esa competencia suele ser una disminución muy rápida en el precio de venta c_S. Los precios de los bolígrafos y de las calculadoras electrónicas tuvieron un pronunciado descenso cuando entraron más competidores al mercado.

Ya que los gastos variables por unidad de producción, c_{VE}, por definición son independientes del volumen de producción, se reducirán la aportación unitaria ($c_S - c_{VE}$) y, por tanto, el valor de η. Por otra parte, una empresa muy grande puede estar en una situación financiera más fuerte y estable con una pequeña eficiencia de aportación y costos fijos elevados, que disuadirán a los competidores de entrar al mercado y abatir el precio de venta. En este argumento está implícito que c_S también es independiente de la producción del proyecto en cuestión. Esto ocurrirá en muchos casos si muchos compradores pequeños seleccionan entre muchos productores alternos y el productor individual no puede ajustar sus precios de acuerdo con su volumen, mientras que en el extremo opuesto, un grupo de productores que están en condiciones de hacer esos ajustes podrían tener dificultades legales.

Resulta interesante poder examinar el efecto de los cambios en la productividad sobre la rentabilidad del proyecto. Los costos de mano de obra, históricamente, se han considerado como costos variables, lo que implica que si los trabajadores pudieran duplicar su producción también se duplicarían sus salarios. Esto puede ocurrir si trabajan a destajo, aunque no suele suceder así. No es posible, en un caso normal, reducir la fuerza de trabajo de acuerdo con la demanda decreciente ni tampoco reclutar y adiestrar operarios cuando sube la demanda. En general, es preferible considerar la mano de obra como costo fijo y cualquier parte de los bonos o incentivos, que sea en verdad proporcional a la producción, se debe incluir en los gastos variables c_{VE}. Si debido a este factor los gastos fijos anuales, A_{FE}, tienen grandes variaciones con el volumen de producción R, entonces la gráfica de punto de equilibrio constará de curvas, se perderá la sencillez del método y se supondrá que un cambio particular en los convenios de productividad implica un cambio escalonado en A_{FE}, en c_{VE} o en ambos. Considérese un aumento en la productividad con el mismo costo fijo de mano de obra, sin que cambien los otros costos fijos. Supóngase que el volumen original de producción R se incrementa, por un aumento en la productividad, en una fracción φ. Por tanto,

$$\Delta R = R\phi \qquad (25\text{-}231)$$

en donde ΔR es el aumento en los volúmenes de ventas o de producción. Al sustituir en la ecuación (25-229) el aumento resultante ΔA_{NP} en las utilidades se expresa con:

$$A_{NP} + \Delta A_{NP} = A_S + \Delta A_S - (A_{VE} + \Delta A_{VE}) - (A_{FE} + 0) \qquad (25\text{-}232)$$

Se resta A_{NP} de la ecuación (25-232) para tener

$$\Delta A_{NP} = \Delta A_S - \Delta A_{VE} = \Delta R(c_S - c_{VE}) \qquad (25\text{-}233)$$

Se ve por las ecuaciones (25-12), (25-229) y (25-233) que

$$\Delta A_{NP}/A_{NP} = \phi/\eta \qquad (25\text{-}234)$$

Entonces, un cambio φ en la productividad de 10% dará por resultado un aumento de 10% en las utilidades cuando η = 1 y un aumento muy grande en ellas cuando η está cerca de cero. Si η es negativa, el aumento en la productividad reduce la utilidad (o aumenta la pérdida).

En la ecuación (25-234) se muestra la tremenda influencia que las tácticas de "ir despacio" pueden tener sobre la rentabilidad de empresas o procesos que tienen bajas eficiencias de aportación, porque una desaceleración tiene poco efecto sobre A_{FE}. A veces ocurre que en diferentes países la productividad por trabajador tiene grandes variaciones en industrias similares. Cuando la baja productividad no es el resultado de tecnología o capital inadecuados, debe ser posible aumentar la productividad sin un incremento proporcional en A_{FE}.

Las gráficas de punto de equilibrio de las figuras 25-2, 25-3 y 25-4 dan una idea de la situación presente. Ya que las líneas son rectas, ello implica que c_S, c_{VE} y A_{FE} permanecerán constantes en toda la gama de variaciones de R, lo cual es interesante. Los valores se basarían en el volumen de producción actual (o programado), pues todos los datos se encuentran en el análisis financiero de la producción actual, con lo que c_S sería $(A_S)_0/R_0$, etc.

Los analistas financieros utilizan dos relaciones bien conocidas, que son: relación entre utilidades y ventas (PSR) y la relación entre aportación y ventas (CSR). La relación entre utilidades y ventas es simplemente la ecuación (25-127) para el margen de utilidad (PM), vuelta a escribir como la relación

$$(\text{PSR}) = A_{NP}/Rc_S \qquad (25\text{-}235)$$

La relación entre aportación y ventas:

$$(\text{CSR}) = (A_S - A_{VE})/A_S = (c_S - c_{VE})/c_S \qquad (25\text{-}236)$$

Se sustituyen estos valores en la ecuación (25-229) para dar

$$\eta = (\text{PSR})/(\text{CSR}) \qquad (25\text{-}237)$$

La eficiencia de la aportación η_0 con el volumen programado se indica al sustituir el valor del mismo en la ecuación (25-229) para dar:

$$\eta_0 = \frac{R_0(c_S - c_{VE}) - A_{FE}}{R_0(c_S - c_{VE})}$$

La forma característica de una gráfica de punto de equilibrio de las figuras 25-2, 25-3 y 25-4 se puede definir con las dos relaciones: (CSR) y η_0, mientras que la escala del proyecto se define con un solo costo anual, como A_{FE}. Esta información se puede utilizar para la investigación rápida del posible efecto sobre las utilidades actuales obtenible con cambios en ciertos factores como precios, gastos y volumen de producción. Se debe tener en cuenta que esta técnica no está destinada a sustituir a los métodos descontados para avalúo de inversiones, sino para lograr una evaluación rápida del probable efecto de los cambios en las condiciones actuales. Si siempre se maximiza la rentabilidad actual, entonces el valor presente del flujo de efectivo descontado siempre se debe hacer lo más grande que se pueda, según lo permitan las condiciones cambiantes en el mundo.

Valuación de la energía térmica recirculada El creciente costo de la energía tiene efecto inflacionario sobre los costos de manufactura. Una forma lógica de reducir los costos de energía es la recirculación de energía térmica siempre que sea posible. [S. A. K. El-Meniawy, F. A. Watson y F. A. Holland, *Indian Chem. Eng.*, **22,** (julio-septiembre 1980)].

Las bombas de calor o térmicas son de gran utilidad para recircular la energía térmica en las plantas de procesos químicos. Con el desembolso adicional de capital fijo, C_{FC}, en un sistema de bomba de calor, se puede lograr una reducción considerable en los costos anuales de calefacción y calentamiento.

Considérese un proceso que requiere calor a razón de Q_D GJ/h, que funciona y horas anuales. Sea el costo unitario del requisito básico de calentamiento de c_B \$ por gigajoule (GJ). Por tanto, el costo anual de calentamiento de esta unidad es $Q_D y c_B$ \$.

Entonces, se puede pensar en el empleo de una bomba térmica para suministrar este calor, de modo que

$$Q_D = W(\text{COP})_A \qquad (25\text{-}238)$$

en donde W es el insumo de energía al compresor en gigajoules por año y $(\text{COP})_A$ es el coeficiente de rendimiento real de la bomba de calor.

Cuando están incluidos cargos por intereses, el desembolso C_{FC} de capital fijo para esa bomba se puede relacionar con un costo anual A_{FC} para la vida esperada de la bomba, en años, con la ecuación

$$A_{FC} = C_{FC}f_{AP} \qquad (25\text{-}239)$$

en donde $f_{AP} = [i(1+i)^n]/[(1+i)^n - 1]$, es el factor presente de la anualidad e i es la tasa fraccionaria de interés anual sobre el dinero tomado a préstamo.

Un valor dado de A_{FC}, permite asignar un costo de $ por gigajoule a la energía térmica disponible con la bomba de calor.

Considérese un sistema de bomba de calor que funciona y h/año y consume W GJ/h de energía de alta calidad para impulsar el compresor. Sea el costo unitario del insumo de energía al compresor de c_I $ por GJ. La cantidad anual de calor entregado por la bomba es de Q_Dy, en gigajoules por año, que, en términos de la ecuación (25-238) se puede escribir como $W(\text{COP})_Ay$ en gigajoules por año. El costo anual de esa energía, sin tener en cuenta ningún costo de mantenimiento, es $W_{cI}y + A_{FC}$) en $ por año. Entonces, el costo unitario c_D de la energía térmica que entrega una bomba impulsada por un compresor es:

$$c_D = (Wc_Iy + A_{FC})/[W(\text{COP})_Ay] \quad \$/\text{GJ} \qquad (25\text{-}240)$$

La relación entre los costos unitarios de la energía térmica entregada y el insumo de energía se puede obtener al combinar las ecuaciones (25-239) y (25-240) para dar

$$(c_D/c_I) = [(1+\psi)/(\text{COP})_A] \qquad (25\text{-}241)$$

en donde $\psi = (C_{FC}/W)(f_{AP}/yc_I)$ y ψ es un parámetro adimensional que incluye datos de costo y empleo de una bomba de calor determinada y debe tener un valor lo más bajo que sea posible, a fin de minimizar el costo unitario del calor entregado c_D. El costo C_{FC}/W es el del capital fijo por unidad de insumo de energía en $ $(\text{GJh}^{-1})^{-1}$ y también debe ser lo más bajo que se pueda, en concordancia con una larga duración y confiabilidad de la bomba. Desde luego, y, el número de horas de funcionamiento por año, debe estar lo más cerca posible del valor máximo de 8760 h para un año de 365 días.

Ya que todos los costos son para un año determinado, las ecuaciones (25-239), (25-240) y (25-241) son independientes de la inflación.

El costo anual del calor entregado por la bomba de calor es de Q_Dyc_D, en donde el costo unitario c_D se indica con la ecuación (25-240). Por tanto, el ahorro en $ anuales en calentamiento es $Q_Dy(c_B - c_D)$, que también se puede escribir en términos de la ecuación (25-238) como $W(\text{COP})_Ay(c_B - c_D)$.

El periodo de recuperación, en años, de una bomba de calor es el capital fijo C_{FC} adicional dividido entre el ahorro anual en costos de calentamiento que se puede escribir como

$$(\text{PBP}) = \left(\frac{C_{FC}}{W}\right)\left[\frac{1}{(\text{COP})_Ay(c_B - c_D)}\right] \qquad (25\text{-}242)$$

y también se puede escribir, en términos de la ecuación (25-241), como

$$(\text{PBP}) = \left(\frac{C_{FC}}{W}\right)\left\{\frac{1}{y[(\text{COP})_Ac_B - c_I(1+\psi)]}\right\} \qquad (25\text{-}243)$$

Para el caso especial de que el costo unitario de la energía aplicada al compresor sea el mismo que el del suministro básico de calor, es decir, $c_B = c_I$, la ecuación (25-243) se simplifica a

$$(\text{PBP}) = \left(\frac{C_{FC}}{W}\right)\frac{1}{yc_I[(\text{COP})_A - (1+\psi)]} \qquad (25\text{-}244)$$

La ecuación (25-244) se puede utilizar para calcular el periodo de recuperación cuando se utilizan electricidad, petróleo o gas para impulsar el compresor y suministrar el calentamiento básico.

La ecuación (25-244) muestra que, para tener un periodo de recuperación (PBP) corto, C_{FC}/W y ψ deben ser bajos mientras que y, $(\text{COP})_A$ y c_I deben ser grandes. Desde luego, conforme aumenta el costo unitario del insumo de energía c_I, los factores económicos de la bomba de calor se vuelven más favorables.

Para la mayoría de los casos el valor de ψ será menor que 0.2 y con una correcta aplicación puede bien ser menor que 0.1. Los valores para el factor anual del valor actual será en la mayor parte de los casos menor que 0.15.

Ya que 1 barril (159 litros) de petróleo suele tener un valor de contenido térmico de 6.12 GJ, un precio mundial del barril de US$40, equivale a US$6.54 por gigajoule.

Para sencillez se sustituye c_I = US$6.66 por gigajoule y un valor conservador de $[(\text{COP})_A - (1+\psi)] = 3$ en la ecuación (25-244) para dar

$$(\text{PBP}) = (C_{FC}/W)(1/20y) \qquad (25\text{-}245)$$

en donde (PBP) es el periodo de recuperación en años, y son las horas de funcionamiento por año y (C_{FC}/W) es el costo de capital fijo en dólares por $(\text{GJh}^{-1})^{-1}$ del insumo de energía primaria.

La ecuación (25-245) muestra que en este caso particular el costo de capital fijo por unidad de insumo de energía (C_{FC}/W) no debe exceder de $160 000 $(\text{GJh}^{-1})^{-1}$, o sea $576 por kilowatt, para tener un periodo de recuperación de 1 año si la bomba de calor funciona 8000 h/año. En este caso, el valor correspondiente de ψ es de 0.12 en una bomba de calor con vida útil de 10 años, comprada con dinero tomado a préstamo con intereses del 10% anual.

La ecuación (25-245) también muestra que el costo de capital fijo por unidad de insumo de energía (C_{FC}/W) no debe exceder de $40 000 $(\text{GJh}^{-1})^{-1}$, o sea $144 por kilowatt para tener un periodo de recuperación de 1 año si la bomba de calor funciona sólo 2000 h/año. En este caso, el valor correspondiente de ψ también es de 0.12 en una bomba de calor con duración de 10 años, comprada con dinero tomado a préstamo con intereses del 10% anual.

CÁLCULO DE LOS COSTOS DEL CAPITAL FIJO

Costo del capital total Por supuesto, el costo instalado de la inversión en capital fijo, C_{FC}, es una partida esencial que se debe pronosticar antes de tomar una decisión de inversión. Forma parte de la inversión de capital total, C_{TC}, definida en la ecuación (25-14). La inversión en capital fijo se suele considerar como el capital requerido para suministrar todas las instalaciones depreciables. A veces se divide en dos clases mediante la definición de los límites de la batería y las instalaciones auxiliares para el proyecto. Los límites de la batería o grupo incluyen todo el equipo para manufactura y excluyen oficinas administrativas, almacenes, servicios generales y otras instalaciones y servicios auxiliares esenciales y no esenciales.

Índices de costos El valor del dinero cambiará debido a la inflación y a la deflación. Por ello, los datos de costos sólo pueden ser exactos en el momento en que se obtienen y pronto pueden ser inadecuados. Los datos de costos de equipo y proyectos en el pasado se pueden convertir a valor presente mediante un índice de costos. Para encontrar el costo presente de un artículo se multiplica su costo histórico por la relación del índice de costos presente dividido entre el índice aplicable

en la fecha original. Lo ideal es que cada partida de costo alterada por la inflación se debe pronosticar por separado. Los costos de mano de obra y de construcción, los precios de materias primas y energía y los precios de los productos cambian a diferentes tasas. Para derivar los índices compuestos se suman fracciones ponderadas de los índices de componentes. La mayor parte de los índices de costos son promedios nacionales y los valores en otra localidad pueden variar mucho.

En la tabla 25-41 se presenta información de algunos índices de costos en Estados Unidos. La revista *Engineering News-Record* actualiza los índices de costos de construcción en sus números de marzo, junio, septiembre y diciembre. El *Oil and Gas Journal* presenta el índice Nelson para refinerías en el primer número de cada trimestre. El índice de costos de plantas *Chemical Engineering* y el índice Marshall and Swift de costo de equipo aparecen en cada número de la revista *Chemical Engineering*. En esas publicaciones se indica la desviación o derivación de los valores base.

La tabla 25-42 está basada en el método sugerido por J. Cran [*Eng. Process Econ.*, **2**, 89-90 (1977)]. Mostró que se podrían derivar índices de costos de razonable exactitud para diversos países con el empleo de dos índices de componentes en la ecuación

$$(CI)_P = 0.327(CI)_{ST} + 0.673(CI)_L \qquad (25\text{-}246)$$

en donde $(CI)_{ST}$ es el índice de precios del acero y $(CI)_L$ es el índice de salarios en un país en particular. La mayor parte de los datos se pueden obtener con el *United Nations Monthly Bulletin of Statistics* o con el informe anual de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) de la industria del hierro y el acero. En la tabla 25-42, los índices de precios tienen la base común de 1970 = 100. Estos valores no relacionan los costos entre un país y otro, porque hay problemas complejos y difíciles; en la tabla se indican las tendencias inflacionarias en los costos de plantas desde 1970 para cada país citado.

Tipos y exactitud de los cálculos Los cálculos del costo del capital se pueden necesitar por muchas razones, entre ellas poder efectuar estudios de factibilidad, permitir a una empresa manufacturera escoger entre inversiones alternas, ayudar en la selección de diseños alternos, dar información para planear la asignación de capital y permitir a un contratista cotizar un nuevo proyecto. Por ello, es esencial obtener la máxima exactitud en los cálculos con mínimo gasto de tiempo y dinero.

Hay dos reglas sencillas para ayudar en el logro de cálculos exactos en todo momento:

1. Verificar que el alcance del proyecto esté descrito en forma completa.

2. Reducir el efecto de los juicios mediante el empleo de métodos estadísticos comprobados para los cálculos, basados en la experiencia.

Los cálculos que son más bajos que los costos reales del proyecto son el resultado de omisiones considerables de equipo, servicios o instalaciones auxiliares y no de errores en los métodos para determinar precios o hacer los cálculos. Para evitarlo, el empleo de una lista de comprobación de conceptos requeridos para un nuevo proyecto (tabla 25-43) puede ser muy valioso.

El primer paso para producir un cálculo exacto es emplear un código estándar de costos para todos los proyectos de construcción. En la tabla 25-44 se presenta un código numérico de costos y en la tabla 25-45 uno alfanumérico típico. El sistema de código de costos se puede utilizar en todas las etapas de cálculos y construcción, para el acopio de datos de costos en forma manual o con computadora. Hay muchos tipos de cálculos de costo de capital fijo pero la American Association of Cost Engineers definió cinco tipos como sigue:

1. *Cálculo de orden de magnitud (cálculo de relación).* Método empírico basado en datos de costos para tipos anteriores de plantas similares; el error probable es de 10 a 50%.

2. *Cálculo para estudio (cálculo por factores).* Es preferible que el de orden de magnitud; requiere conocer los principales componentes del equipo; se utiliza para estudios de factibilidad; el error probable es hasta de 30%.

3. *Cálculo preliminar (cálculos para aprobación del presupuesto).* Requiere información más detallada que el cálculo para estudio; el error probable es hasta de 20%.

4. *Cálculo definitivo (cálculo para control del proyecto).* Basado en una cantidad considerable de datos antes de la preparación de planos y especificaciones finales; el error probable es de alrededor de 10%.

5. *Cálculo detallado (cálculo en firme o por el contratista).* Requiere planos, especificaciones y estudios topográficos completos del sitio; error probable con aproximación de 5%.

Se puede lograr mayor exactitud en los cálculos, dentro de ciertos límites, si se invierten más tiempo y dinero. Cuando mayor sea la exactitud requerida, se necesitan más tiempo y esfuerzo para obtener los datos de diseño y costo antes de hacer el cálculo.

W. R. Park investigó el costo y la exactitud de los cálculos para un proyecto con costo total de $1 millón, como se indica en la figura 25-41 (*Cost Engineering Analysis*, Wiley, New York, 1973, p. 133). En la tabla 25-46 aparecen costos promedio típicos para efectuar los cálculos [A. Pikulik y H. E. Diaz, *Chem. Eng.*, **84**, 106-122 (octubre 10, 1977)].

TABLA 25-41 Índices de costos para Estados Unidos

	Índices de precios*				Índices de costo de construcción				
Año	Al consumidor	Bienes al mayoreo (todos)	Total industrias químicas y afines	Productos químicos industriales	Equipo para productos químicos†	Plantas de proceso ‡	Refinerías de petróleo§	Construcción general¶	Edificios en general¶
1969	110	107	100	100	283	119	115	119	118
1970	116	110	102	101	301	126	127	129	124
1971	121	114	104	102	319	132	141	148	141
1972	125	119	104	101	330	137	153	164	156
1973	133	135	110	103	344	144	163	177	169
1974	147	161	147	152	398	165	182	189	179
1975	161	175	181	207	444	182	200	207	194
1976	170	182	187	219	472	192	215	224	212
1977	181	194	192	224	505	204	223	241	230
1978	195	209	199	226	545	219	244	259	249
1979	217	234	222	264	599	239	260	281	271
1980	247	269	260	324	660	261	286	301	289
1981	272	293	288	363	721	297	315	329	310
1982	287(Mayo)	299(Junio)	294(Junio)	353(Junio)	746	314	340	356	331
1983	....	....	....	....	761	....	....	379	353

*Bureau of Labor Statistics, 1967 = 100; †Marshall y Swift, *Chem. Eng.*, 1926 = 100; ‡*Chem. Eng.*, índice para plantas 1957-1969 = 100; §índice Nelson para refinerías, *Oil Gas J.*, 1967 = 100; ¶*Eng. News Rec.*, 1967 = 100.

TABLA 25-42 Índices internacionales de costos de plantas*

Año	Australia	Austria	Bélgica	Canadá	Dinamarca	Francia	Rep. Fed. Alemana	Irlanda	Holanda	Sud-áfrica	España	Suecia	Gran Bretaña	Estados Unidos
1971	106	107	105	107	109	109	110	113	108	112	112	99	113	104
1972	116	114	117	115	116	120	118	126	129	115	124	103	126	107
1973	125	126	133	123	137	141	132	145	138	128	142	105	132	113
1974	143	156	162	135	170	168	144	176	154	147	175	108	148	119
1975	186	199	188	165	204	197	176	240	173	188	217	154	205	149
1976	214	195	201	189	211	219	174	287	191	219	267	171	245	149
1977	245	217	211	207	240	256	186	344	195	263	337	182	285	163
1978	270	233	227	224	260	277	194	356	210	284	397	197	302	176
1979	286	257	243	244	280	311	203	447	219	328	457	212	348	193

*De J. Cran, *Eng. Process Econ.*, 2, 89-90 (1977).
NOTA: Estas cifras son al 1 de enero de cada año (1970 = 100).

Cálculos rápidos

Métodos de relaciones J. E. Haselbarth [*Chem. Eng.*, **74**, 214-215, (diciembre 4, 1967)] publicó datos en que daba la inversión de capital total por unidad de capacidad de producción anual, C_{TC}/R. En la tabla 25-47 aparecen datos de muchos procesos que incluyen unidades de producción construidas en terreno ya urbanizado. Las plantas que se construyen en terrenos baldíos costarían alrededor de 30 a 40% más, pero las ampliaciones a una planta existente costarían alrededor de 20 a 30% menos que los valores de la tabla 25-47; en la misma se dan también las inversiones totales de capital fijo en instalaciones dentro de los límites de batería. Corresponden a valores de Estados Unidos según un índice Marshall and Swift de 1000 y están tomados de datos de D. R. Woods (*Financial Decision Making in the Process Industry*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1975, pp. 288-290). L. Lynn y R. F. Howland [*Chem. Eng.*, **67**, 131-136, febrero 8, 1960)] estudiaron las relaciones de capital de 17 industrias de proceso y resumieron los datos de más de 1000 procesos. La relación o razón de capital (CR) para una planta erigida en un terreno baldío se define como la relación entre la inversión en capital fijo C_{FC} y los ingresos por ventas anuales A_S:

$$(CR) = C_{FC}/A_S \qquad (25\text{-}134)$$

Sin embargo, Lynn y Howland incluyeron en el costo del capital fijo no sólo el dinero invertido en instalaciones para producción y almacenamiento sino también el invertido en terrenos, gastos de investigación y desarrollo y las instalaciones auxiliares necesarias para apoyar el proceso. En la tabla 25-48 se enumeran los valores típicos de las relaciones de capital en 1958.

Ambos métodos anteriores son un tanto inexactos y sólo se pueden utilizar para valores aproximados. Tienen la ventaja de que se puede hacer un cálculo en unos minutos y no requieren trabajo de diseño o diagramas de flujo del proceso.

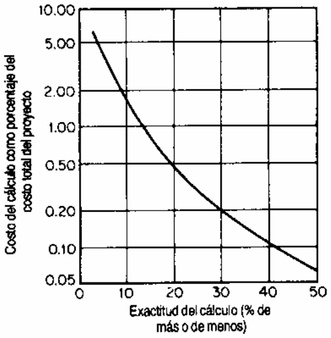


FIG. 25-41 Relación entre el costo y la exactitud de los cálculos de costos.

Métodos exponenciales Se pueden hacer cálculos rápidos del costo del capital con el empleo de exponentes de la relación o razón de capacidad, basados en los datos existentes de costos de una empresa o tomados de las publicaciones.

Si el costo de un equipo o de una planta con tamaño o capacidad q_1 es C_1, entonces el costo de un equipo o planta similares, de tamaño o capacidad q_2, se puede calcular con

$$C_2 = C_1(q_2/q_1)^n \qquad (25\text{-}247)$$

en donde el valor del exponente n depende del tipo de equipo o planta. Se deben utilizar los índices de costos para actualizar los costos en un año dado. En la tabla 25-47 aparecen valores típicos de n para varios procesos, junto con el costo de una planta de capacidad dada en un momento determinado y la gama de capacidad para aplicabilidad. En las plantas de proceso, la capacidad se expresa en términos de la capacidad anual de producción en toneladas métricas.

Se han establecido correlaciones exponenciales de costos para determinados equipos. Hay que tener cuidado de determinar si el costo del equipo está indicado como libre a bordo (FOB), entregado (DEL) o instalado (INST), pues no siempre se menciona con claridad. En muchos casos, el costo se debe correlacionar con parámetros afines a la capacidad, como superficie para intercambiadores de calor o potencia para el equipo de molienda. En estas correlaciones de costos hay cuatro fuentes principales de error:

1. Exceso de simplificación al correlacionar el costo del equipo en términos de una sola variable.
2. Representación de datos con el empleo de una simple relación exponencial.
3. Omisión en incluir los efectos de los adelantos tecnológicos.
4. Errores cometidos por circunstancias especiales.

En la tabla 25-49 se dan valores típicos del exponente n para muchos tipos de equipo. Los precios son en Estados Unidos con un índice Marshall and Swift de 1000, principalmente para equipo de acero al carbono.

Cálculos mediante factores Casi todos los métodos de factores para calcular el costo instalado total de una planta de proceso están basados en una combinación de componentes de costos de materiales, mano de obra e indirectos. Se pueden agrupar en:

1. Costo de los principales equipos
2. Costo de la instalación completa del equipo
3. Equipo auxiliar para el funcionamiento del proceso
4. Gastos de ingeniería y de campo
5. Honorarios de contratistas y contingencias (imprevistos)

Se utilizan muchos factores, según el tiempo disponible o la exactitud esperada. Por lo general, el insumo de información requerida es el costo base. La determinación de este costo suele requerir el conocimiento de los tamaños de equipo, quizá con el empleo de balances de masa y energía para el proceso propuesto.

TABLA 25-43 Li

Terreno:
Levantamientos
Honorarios
Costo del terreno
Mejoramiento del terre
Desmonte
Nivelación
Caminos de acceso e
Andadores
Vías férreas
Alambradas y cercas
Zonas de estacionam
Otras zonas pavimen
Muelles y andenes
Instalaciones recreat
Jardinería
Edificios para proceso
(Enumerar lo necesa
turas, plataformas,
rrieles, montacarg
Edificios auxiliares:
Administración y ofi
Servicio médico
Cafetería
Garaje
Almacenes para pro
Almacén de repuest
Talleres de mantenii
mecánico, soldad
Vigilancia y protecc
Casetas para mangu
Vestidores
Lugares para fumar
Edificio para person
Oficina y plataform
Laboratorio de inve
Laboratorios de con
Servicios para edificic
Plomería en general
Calefacción
Ventilación
Recolección de pol
Acondicionamient
Sistemas de rociad
Elevadores, escaler
Iluminación de edi
Teléfonos
Alarmas de incendi
Sistema de llamada
Sistema de interco
Pintura
Equipo para proceso:
(Preparar la lista co
Equipo general:
Muebles y equipo
Equipo para cafete
Equipo de segurida
Equipo para taller
Equipo para mante
Equipo de laborato
Casilleros y banca
Equipo para garaje
Estanterías, cajone
Equipo para limpi
Extinguidores, ma
Accesorios para proc
Tubería: acero al c
aluminio, cobre,
reforzado
Soportes y acceso
Aislamiento para t
Instrumentos
Tableros de instru
Componentes eléc
accesorios, alim

Gran Bretaña	Estados Unidos
113	104
126	107
132	113
148	119
205	149
245	149
285	163
302	176
348	193

ı trabajo de diseño o

cálculos rápidos del
la relación o razón de
tos de una empresa o

maño o capacidad q_1
milares, de tamaño o

(25-247)

ю de equipo o planta.
lizar los costos en un
icos de n para varios
apacidad dada en un
ara aplicabilidad. En
ı términos de la capa-

es de costos para de-
leterminar si el costo
B), entregado (DEL)
con claridad. En mu-
arámetros afines a la
es de calor o potencia
s de costos hay cuatro

el costo del equipo en

: una simple relación

ıntos tecnológicos.
eciales.
ımente n para muchos
Jnidos con un índice
ra equipo de acero al

métodos de factores
ınta de proceso están
costos de materiales,

xo
el proceso

s (imprevistos)
ponible o la exactitud
ın requerida es el cos-
uerir el conocimiento
le balances de masa y

TABLA 25-43 Lista de comprobación de partidas para cálculos de costo de capital fijo

Terreno:
- Levantamientos
- Honorarios
- Costo del terreno

Mejoramiento del terreno:
- Desmonte
- Nivelación
- Caminos de acceso e internos
- Andadores
- Vías férreas
- Alambradas y cercas
- Zonas de estacionamiento
- Otras zonas pavimentadas
- Muelles y andenes
- Instalaciones recreativas
- Jardinería

Edificios para procesos:
- (Enumerar lo necesario). Incluir según se requiera subestructura, superestructuras, plataformas, soportes, escaleras, escalas, vías de acceso, grúas, monorrieles, montacargas, elevadores

Edificios auxiliares:
- Administración y oficinas
- Servicio médico
- Cafetería
- Garaje
- Almacenes para productos
- Almacén de repuestos y suministros
- Talleres de mantenimiento: eléctrico, tuberías, hojalatería (chapistería), mecánico, soldadura, carpintería, instrumentos
- Vigilancia y protección
- Casetas para mangueras
- Vestidores
- Lugares para fumar (en ciertas plantas)
- Edificio para personal
- Oficina y plataformas para embarques
- Laboratorio de investigación
- Laboratorios de control

Servicios para edificios:
- Plomería en general
- Calefacción
- Ventilación
- Recolección de polvo
- Acondicionamiento de aire
- Sistemas de rociadores
- Elevadores, escaleras eléctricas
- Iluminación de edificios
- Teléfonos
- Alarmas de incendio
- Sistema de llamadas
- Sistema de intercomunicación
- Pintura

Equipo para proceso:
- (Preparar la lista con los diagramas de flujo aprobados)

Equipo general:
- Muebles y equipo de oficina
- Equipo para cafetería
- Equipo de seguridad y médico
- Equipo para talleres
- Equipo para mantenimiento mayor de vehículos y de manejo de materiales
- Equipo de laboratorio
- Casilleros y bancas en los vestidores
- Equipo para garaje y taller de vehículos
- Estanterías, cajones, tarimas, carretillas de mano
- Equipo para limpieza
- Extinguidores, mangueras y carros para incendio

Accesorios para proceso:
- Tubería: acero al carbono, aleación, hierro fundido, forrada de plomo, aluminio, cobre, asbesto-cemento, cerámica, plástico, caucho, concreto reforzado
- Soportes y accesorios para tubos, válvulas
- Aislamiento para tubería y equipo
- Instrumentos
- Tableros de instrumentos
- Componentes eléctricos: tableros, interruptores, motores, *conduit*, alambrado, accesorios, alimentadores, tierras, alambrado para instrumentos y controles

Servicios generales:
- Casa de calderas
- Incinerador
- Eliminación de cenizas
- Tratamiento de agua de alimentación de calderas
- Generación de electricidad
- Subestaciones eléctricas
- Planta de refrigeración
- Planta para compresores de aire
- Pozos
- Toma de agua en ríos
- Tratamiento primario de agua: filtración, coagulación, aereación
- Tratamiento secundario de agua: desionización, desmineralización, control de pH y dureza
- Torres de enfriamiento
- Almacenamiento de agua
- Descarga de efluentes
- Alcantarillas para desechos del proceso
- Estaciones de bombeo de desechos del proceso
- Drenajes para aguas negras
- Estaciones de bombeo de aguas negras
- Embalses y estanques para recolección
- Tratamiento de desechos, incluso gases
- Alcantarillado para agua de lluvia

Patios e instalaciones fuera de edificio principal:
- Tuberías para procesos: vapor, condensado, agua, gas, combustóleo, aire, agua para incendios, instrumentos, alambrado
- Equipo para manejo de materia prima y producto terminado: elevadores, montacargas, transportadores de banda y neumáticos, grúas
- Almacenamiento de materia prima y producto terminado: tanques, esferas, tambores, cajones, silos
- Recepción, mezcla y almacenamiento de combustibles
- Estaciones para cargar el producto
- Básculas para ferrocarril y camiones

Diversos:
- Trabajo de demolición y modificación
- Catalizadores
- Productos químicos (sólo carga inicial)
- Piezas de repuesto (refacciones) en general
- Equipo sobrante; valor de suministros y equipo
- Arrendamiento de equipo para construcción
- Primas por reducción de tiempo para construcción
- Inclusión de inflación en los costos
- Cargos por flete
- Impuestos y seguros
- Derechos de importación
- Provisión para modificaciones y construcciones adicionales durante la puesta en marcha

Costos de ingeniería:
- Administrativos
- Ingeniería de proyecto, proceso y general
- Elaboración de planos
- Ingeniería de costos
- Procuración, expeditación e inspección
- Gastos de viaje y viáticos
- Reproducciones y copias
- Comunicaciones
- Maquetas
- Honorarios a arquitectos e ingenieros externos

Gastos de construcción:
- Construcción, operación y mantenimiento durante la construcción de cobertizos, oficinas, caminos, estacionamientos, vías férreas, equipo eléctrico, tuberías, comunicaciones y cercas
- Herramientas y equipo para construcción
- Personal y gastos de almacenamiento
- Supervisión de la construcción
- Contabilidad y tomaduría de tiempo
- Compras y transporte
- Equipo de seguridad y médico
- Vigilantes diurnos y nocturnos
- Gastos de viaje y transporte para trabajadores especializados
- Beneficios adicionales (prestaciones)
- Equipo para limpieza
- Protección contra la intemperie
- Permisos y licencias especiales, pruebas en el campo
- Renta de espacio fuera del sitio
- Honorarios y gastos de oficina matriz del contratista
- Impuestos, seguros, intereses

TABLA 25-44 Código estándar para costos (numérico)

Grupo de código	Subdivisiones
Costos directos	
0-349	Sección de proceso (equipo para proceso listado en secuencias 1, 2, 3, 4, 5,..., *N* de diagrama de flujo, precedido por número de identificación del proceso)
350-399	Mejoramiento del terreno
400-449	Edificios para proceso
450-489	Edificios auxiliares
490-499	Equipo auxiliar
500-599	Accesorios para proceso (tubería, aislamiento, instrumentación, instalación eléctrica, etc.)
600-699	Servicios generales y en patios (planta de calderas, refrigeración, aire comprimido, suministro y tratamiento de agua, efluentes, protección contra incendio, tuberías y equipo eléctrico en patios, equipo de manejo de materiales, almacenamiento de producto terminado)
700-729	Subestructuras
730-749	Superestructuras
750	Pintura
760-769	Servicios para edificios
770-799	Demolición y modificaciones a estructuras existentes
800-819	Equipo, suministros y materiales sobrantes; pagos de regalías
820-830	Modificaciones al diseño, construcción y trabajo adicional durante la puesta en marcha
Costos indirectos	
850-874	Ingeniería en oficina matriz
875-889	Honorarios y cargos de arquitectos e ingenieros
900-969	Gastos de construcción
970-994	Impuestos y seguros
995	Gastos en oficina matriz de contratista
996	Honorarios de contratista

Costo del equipo o base El costo total de los principales equipos se suele utilizar como costo base. También hay que tener cuidado con los costos del equipo que estén cotizados como instalado (INST), entregado en el sitio (DEL) o a bordo del vehículo para transporte en el sitio del fabricante (FOB).

El **equipo base** incluye todo el que está dentro de los límites de la batería o grupo y de costo importante, como una bomba. Por ejemplo, los tanques de almacenamiento, tambores de volteo, acumuladores, intercambiadores de calor y bombas, se clasifican como equipo principal de la planta (MPI). Cuando se empiece a crear el diagrama de flujo del proceso, es aconsejable aumentar el costo estimado de (MPI) entre 10 y 20% para futuras adiciones. Cuando el alcance del proceso esté bien definido, los costos de (MPI) se deben aumentar entre 1 y 10%.

Para cálculos del orden de magnitud, el costo del equipo entregado $(C_{EQ})_{DEL}$ es entre 1.1 y 1.25 veces el costo FOB, $(C_{EQ})_{FOB}$. Este factor puede estar en el punto bajo para compras nacionales y en el punto alto para importaciones. Los costos de instalación incluyen desempaque, montaje y conexión con los auxiliares o servicios generales existentes. El costo del equipo instalado $(C_{EQ})_{INST}$ varía según el tipo y el tamaño, pero en general, es entre 1.4 y 2.2 veces el costo del equipo entregado $(C_{EQ})_{DEL}$.

En los **métodos de un solo factor**, se concentran las diversas partidas de gasto en un factor, que se suele utilizar para multiplicar el costo total del equipo entregado $\Sigma(C_{EQ})_{DEL}$ para dar el costo del capital fijo de la planta, dentro de los límites de la batería

$$(C_{FC})_{BL} = f\Sigma(C_{EQ})_{DEL} \qquad (25\text{-}248)$$

Los valores típicos de los factores *f* individuales para costos de planta en límites de batería, para instalaciones de acero al carbono incluyendo los auxiliares, pero no el terreno, son:

Procesamiento de sólidos (S)	3.8
Procesamiento de sólidos y fluidos (S-F)	4.1
Procesamiento de fluidos (F)	4.8

TABLA 25-45 Código estándar para costos (alfanumérico)

A	Trabajo en el sitio y cimentación
B	Edificios (sin cimientos)
C	Estructuras y plataformas de acero (que no sean edificios)
D	Intercambiadores de calor
E	Torres de fraccionamiento
F	Tanques y tambores
G	Bombas y sus propulsores
H	Compresores y sopladores
J	Reactores y convertidores
K	Equipo para molienda, trituración y clasificación
L	Equipo para manejo de materiales
M	Calentadores a fuego directo
N	Catalizadores y productos químicos
O	Equipo de laboratorio
P	Tubería
Q	Instrumentos y controles
R	Instalación eléctrica
S	Aislamientos y pintura
T	Equipo para servicios (calderas, generadores, refrigeración)
U	Accesorios para planta y edificios (vías férreas, alambradas, etc.)
V	Equipo de laboratorio
W	Equipo de seguridad
X	Almacén de repuestos (refacciones)
100	Equipo y materiales entregados e instalados (A hasta X)
200	Impuestos sobre ventas y tenencia
300	Instalaciones temporales
320	Equipo, herramientas y suministros para construcción
340	Supervisión de la construcción
360	Gastos de la oficina en el sitio
380	Gastos de almacenamiento
400	Impuestos y cuotas sobre nóminas
500	Costos de ingeniería en oficina matriz
600	Costos de procuración
700	Ingenieros residentes
800	Pagos por regalías
900	Gastos administrativos indirectos y utilidades de ingeniería
950	Gastos administrativos, indirectos y utilidad del contratista

Por tanto, los factores varían según el tipo de procesamiento aunque las divisiones entre las clasificaciones no están bien definidas y se requiere cuidado para la selección del factor correcto.

Los **métodos de factores múltiples** incluyen la aportación a los costos de cada actividad determinada, que se pueden sumar para dar un factor global. Este factor se puede utilizar para multiplicar el costo total del equipo entregado $\Sigma(C_{EQ})_{DEL}$ para lograr una estimación de la inversión total en capital fijo para plantas totalmente nuevas o en límites de batería. Los costos se pueden dividir en cuatro grupos:

1. Costo de la planta dentro de los límites de la batería
2. Costo de los auxiliares
3. Costo de gastos de ingeniería y de campo
4. Costo de honorarios de contratista más las contingencias (imprevistos)

En la tabla 25-50 se dan los valores típicos de esos factores para instalaciones de acero al carbono, tomados de los datos de D. R. Woods (*Financial Decision Making in the Process Industry*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1975, p. 184). Los auxiliares y la preparación

TABLA 25-46 Gamas típicas de costos para preparar cálculos (Precios de 1976)*

	Costo del proyecto		
Tipo de cálculo	Menos de $1 millón. Miles de $	$1 a $5 millones. Miles de $	$5 a $50 millones. Miles de $
Cálculo para estudio	5-15	12-30	20-40
Cálculo preliminar (alcance o autorización)	15-35	30-60	50-90
Cálculo definitivo (control del proyecto)	25-60	60-120	100-230

*De A. Pikulik y H. E. Diaz, "Cost Estimating for Major Process Equipment", *Chem. Eng.*, **84**, 106-122 (octubre 10, 1977).

TABLA 25-47

Producto
Acero
Acetaldehído
Acetaldehído
Acetileno
Acetona
Acetona
Ácido acético
Ácido acrílico
Ácido adípico
Acrílicas, fibras
Acrilonitrilo
Alquilbenceno (linea
Alumbre líquido
Alúmina
Aluminio
Aluminio, sulfato
Amoniaco (anhidro licuado)
Amonio, nitrato
Azúcar
Estireno
Estireno
Estireno
Jabón
Propileno, óxido
Propileno, óxido
Proteína
Pulpa ácida de sulfi
Resorcinol
Seudocumeno
Sodio
Sodio, carbonato (sosa)
Sodio, clorato
Sodio, hidróxido
Sorbitol

NOTA: Todos los cos

TABLA 25-48 proceso

In
Productos químicos e
Negro de humo
Explosivos
Vidrio
Fibras sintéticas
Alimentos procesado
Inorgánicos, pesados
Metales no ferrosos
Petróleo
Productos farmacéuti
Pigmentos, pinturas y
Pulpa y papel
Resinas y plásticos
Caucho (hule)
Jabón y detergentes
Acero
Azufre
Promedio

*Relación de capita

›s (alfanumérico)

edificios)

ı

frigeración)
alambradas, etc.)

ıasta X)

ıcción

: ingeniería
contratista

ocesamiento aunque
ien definidas y se re-
ıto.
ı la aportación a los
eden sumar para dar
ı multiplicar el costo
una estimación de la
nte nuevas o en límı-
ıtro grupos:
la batería

s contingencias (im-

e esos factores para
latos de D. R. Woods
ustry, Prentice-Hall,
ıres y la preparación

para preparar

del proyecto	
a $5 mi- ınes. Mi- les de $	$5 a $50 millones. Miles de $
12-30	20-40
30-60	50-90
50-120	100-230

ır Process Equipment",

TABLA 25-47 Datos de costo de capital para plantas de proceso

Producto	Proceso	Tamaño, 1000 tons métricas/año	Costo aproximado, $ × 10⁶	Costo $/ton métrica anual	Gama de tamaño, 1000 tons métricas/año	Exponente, *n*
Acero	Integrado	500	767	1534	150–4000	0.65
Acetaldehído	Etanol	23	4.0	174		
Acetaldehído	Etileno	50	13.7	274	25–100	0.70
Acetileno	Gas natural o petroquímico	15	23.4	1560	2–150	0.70
Acetona	Isopropanol	25	23.4	936		
Acetona	Propileno	10	25	2500	2–50	0.45
Ácido acético	Metanol	10	77	7700	2–50	0.68
Ácido acrílico	Propileno; da subproducto metilacrilato	1.1	10.7	9730		
Ácido adípico		10	21.7	2170	5–50	0.53
Acrílicas, fibras		10	27.4	2740	4–20	0.69
Acrilonitrilo	Acetileno/HCN	100	107	1070	10–500	0.60
Alquilbenceno (lineal)		40	9.4	235	10–120	0.70
Alumbre líquido		10	3.0	300	7–350	0.71
Alúmina	Bauxita	200	124	620	100–400	0.66
Aluminio	Alúmina	50	177	3540	25–200	0.80
Aluminio, sulfato		50	6.0	120	10–500	0.71
Amoniaco (anhidro licuado)	Reformación de nafta por vapor	150	37	247	30–330	0.70
	Reformación de gas natural por vapor	150	30	200	30–330	0.70
	Oxidación parcial del gas natural	150	37	247	30–330	0.70
	Nafta	150	44	293	30–330	0.70
	Combustóleo	150	47	313	30–330	0.70
	Carbón	150	63	420	30–330	0.70
Amonio, nitrato	Amoniaco y ácido nítrico	100	9.4	94	15–300	0.65
Azúcar	Caña de azúcar. Trabaja 120 días/año	10	10.7	1070	6–30	0.41
Estireno	Aromáticos reformados	32	21.7	677		
Estireno	Benceno y etileno	100	35	350	20–400	0.67
Estireno	Etilbenceno	40	11.7	292		
Jabón		3	0.87	289	1.5–7	0.23
Propileno, óxido	Clorhidrina	40	14.4	358	25–60	0.90
Propileno, óxido	Propileno e isobutano	60	42.7	711		
	Electroquímico	60	39	650		
Proteína	Concentrados parafínicos	60	33.4	556		
Pulpa ácida de sulfito	Blanqueada, con recuperación	50	66.7	1334	8–200	0.78
	Sin recuperación	50	60	1200	8–200	0.86
Resorcinol	Sulfonación	1.8	3.7	2040		
Seudocumeno	Separación por destilación	32	6.0	188		
Sodio		18	26.4	1463		
Sodio, carbonato (sosa)	Proceso Solvay	120	1.27	10.6	60–200	0.55
		360	130	361		
Sodio, clorato		30	16.7	556	15–60	0.66
Sodio, hidróxido	Electrólisis de salmuera	30	33.4	1110	3–300	0.38
Sorbitol	Miel de maíz	4.5	2.7	593		

NOTA: Todos los costos son para Estados Unidos con M & S = 1000 y suponen 330 días de trabajo por año.

TABLA 25-48 Relaciones de capital para industrias de proceso

Industria	Relación de capital,* 1958
Productos químicos en general	2.02
Negro de humo	3.98
Explosivos	1.64
Vidrio	1.46
Fibras sintéticas	3.44
Alimentos procesados	0.66
Inorgánicos, pesados	2.24
Metales no ferrosos	3.31
Petróleo	3.08
Productos farmacéuticos	0.92
Pigmentos, pinturas y tintas	1.04
Pulpa y papel	2.01
Resinas y plásticos	1.90
Caucho (hule)	1.04
Jabón y detergentes	0.69
Acero	2.78
Azufre	1.97
Promedio	2.01

*Relación de capital = (inversión en capital fijo)/(ingresos anuales por ventas).

del terreno se presentan, en la citada tabla, como factores del costo del equipo entregado; C. A. Miller [*Chem. Eng.*, **72**, 226-236 (septiembre 13, 1965)] expresa los costos de los auxiliares como factores del costo en el límite de la batería (BL). En la tabla 25-51 se presentan los factores determinados por Miller, que son más detallados que los de Woods.

Ejemplo 23 Calcúlese el costo instalado total de una planta, construida en terreno baldío, que produce un producto químico orgánico (proceso S-F), en forma continua. Se supone que el costo total del equipo entregado, $\Sigma(C_{EQ})_{DEL}$ es de $1 millón y se utilizarán los factores correspondientes de la tabla 25-50.

Los valores calculados de las diversas aportaciones, según la tabla 25-52, dan una cifra estimada de $4 280 000 de inversión total en capital fijo, incluso un porcentaje para contingencias (imprevistos).

Un método de factores múltiples para el cálculo de prediseño ha sido propuesto por D. H. Allen y R. C. Page [*Chem. Eng.*, **82**, 142-150 (marzo 3, 1975)] para plantas tipo fluido (F) que incluyen procesamiento de vapor. Este método requiere el siguiente insumo de información:

1. Diagrama de flujo de la planta que indique los componentes y corrientes de proceso principales de la planta
2. Insumo total de corrientes de proceso por año
3. Condiciones extremas de temperatura y presiones, si las hay

TABLA 25-49 Exponentes típicos para costo del equipo según la capacidad

Equipo	Tamaño	Unidad	Costo aproximado, $000	Gama de tamaño	Exponente
Agitador, turbina, entrada superior, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	7.0	2–30 (1.5–22.4)	0.45
Agitador, turbina, entrada superior, cerrado, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	10.7	2–200 (1.5–150)	0.56
Soplador centrífugo, 4 psi (27.6 kPa), DEL, sin motor	10 (4.72)	10^3 sft^3/min (sm^3/s)	67	0.5–150 (0.24–71)	0.60
Quebradora de cono, FOB sin motor	100 (74.6)	hp (kW)	130	30–300 (22.4–224)	0.92
Quebradora de mandíbulas, FOB, sin motor	10 (7.5)	hp (kW)	34	1–60 (0.75–44.7)	0.65
Quebradora de mandíbulas, FOB sin motor	100 (74.6)	hp (kW)	284	60–400 (44.7–300)	0.81
Bomba centrífuga, C/S, FOB sin motor	10 (7.5)	hp (kW)	1.6	0.5–40 (0.37–30)	0.30
Bomba centrífuga, C/S, FOB sin motor	100 (74.6)	hp (kW)	4.4	40–400 (30–300)	0.67
Transportador de banda, C/S, FOB sin motor	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	6.7	60–200 (5.6–18.6)	0.50
Transportador de sinfín, C/S, DEL, sin motor	70 (540)	ft × m diámetro (m × mm diámetro)	10	50–100 (390–780)	0.46
Centrífuga, automática por cargas, horizontal, C/S, FOB	20 (1.86)	Área filtro, ft^2, (m^2)	100	7–80 (0.65–7.43)	0.65
Compresor reciprocante, menos de 1000 psi, FOB con motor	300 (224)	hp (kW)	133	1–20000 (0.75–1490)	0.84
Cristalizador, circulación forzada, C/S, FOB	100 (91)	ton/día (TM/día)	283	10–1000 (9.1–970)	0.59
Secador de tambor, C/S, FOB, sin motor	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	73	10–400 (0.9–37)	0.52
Secador por vacío, bandejas, C/S, FOB, sin bandejas ni equipo de vacío	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	17	15–1000 (1.4–93)	0.56
Colector de polvo, tela, agitador, FOB, con motor	10^4 (4.7)	sft^3/min (m^3/s)	17	10^3–5 × 10^4 (0.47–23.6)	0.79
Colector de polvo, ciclones múltiples, FOB	10^4 (4.7)	sft^3/min (m^3/s)	7	10^3–1.5 × 10^5 (0.47–70.8)	0.66
	10^4 (4.7)	ft^3/min at 40°C	77	10^3–8 × 10^4 (0.47–73.8)	0.39
Precipitador electrostático, FOB	2 × 10^5 (94)	(m^3/s)	383	8 × 10^4–10^6 (37.8–472)	0.81
Eyector, una etapa, vapor a 100 psig, FOB	3 (10^{-2})	lb/h (aire/mm Hg absolutos)	2.7	0.2–30 (6.8 × 10^{-4}–0.1)	0.50
Eyector, dos etapas, FOB, con condensador y tubos	1 (3.4 × 10^{-3})	[kg/h/(N/m^2)]	6.3	0.2–10 (6.8 × 10^{-4}–3.4 × 10^{-2})	0.43
Eyector, etapas múltiples, FOB, con condensador y tubos	10 (3.4 × 10^{-2})	[kg/h/(N/m^2)]	16.7	0.2–100 (6.8 × 10^{-4}–0.34)	0.26
Filtro de hojas, vertical, presión, C/S, DEL	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	17	30–1500 (2.8–140)	0.57
Filtro, placa y marco, C/S, DEL	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	5.7	10–1000 (0.9–93)	0.55
Filtro, tambor rotatorio al vacío, C/S, FOB con motor	100 (9.3)	ft^2 (m^2)	63.3	10–1500 (0.9–140)	0.48
Intercambiador de calor, casco y tubos, cabeza flotante, C/S, DEL; tubo fijo × 0.85, tubo en U × 0.87, cazo × 1.35	1000 (9.3)	ft^2 (m^2)	21.7	20–20,000 (1.9–1860)	0.59
Intercambiador de calor, tornillo térmico, C/S, FOB, sin motor	100 (9.3)	ft (m^2)	33	10–400 (0.9–37)	0.78
Marmita con camisa, forro de vidrio, FOB	100 (0.38)	U.S. gal (m^3)	53	50–1000 (0.2–3.8)	0.48
Motores, ca, inducción, rotor devanado, TEFC, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	12.3	10–25 (7.5–18.6)	0.56
Motores, ca, inducción, rotor devanado, TEFC, FOB	70 (52)	hp (kW)	19.3	25–200 (18.6–149)	0.77
Tubo, tramo recto típico, C/S, FOB, $/ft					
Instalado: $/ft × 6 a 7	6 (152)	Diámetro nominal, in, (mm)	0.0093	1–24 (25–610)	1.33
Red compleja, FOB $/ft × 2 Instalada $/ft × 13					
Recipiente a presión, tambor horizontal (150 psig), C/S	1000 (3.8)	U.S. gal (m^3)	6.3	100–80000 (0.4–302)	0.62
Reactores con camisa, con mezclador, FOB	100 (0.38)	U.S. gal (m^3)	9.3	10–4000 (0.04–15.1)	0.53
Unidad de refrigeración mecánica, INST	100 (351.7)	U.S. tons (kW)	133	10–1000 (35.2–3520)	0.73
Tamiz vibratorio, una mesa, DEL, con motor	500 (46)	ft^2 (m^2)	10	150–700 (14–65)	0.62
Chimenea, acero al carbono (C/S)	. . . . . .	ft (m)	—	20–150 (6.1–45.7)	1.00
Tanque atm., cilíndrico, horizontal, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m^3)	4.7	100–40000 (0.4–151)	0.57
Cilíndrico vertical, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m^3)	3.3	100–20000 (0.4–76)	0.30
Vertical, agitado, C/S, FOB con motor	1000 (3.8)	U.S. gal (m^3)	15	70–1500 (0.26–5.7)	0.57
Vertical con camisa, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m^3)	12.3	100–20000 (0.4–76)	0.50
Torres de destilación y componentes, INST	4000 (bandejas)	$\left(\frac{\text{carga, lb/año}}{10^6}\right)^{0.65}$	3300	300–30000	1.00

TABLA 25-50 F

P

Equipo, entregado
Instalado
Tubería
Cimientos de acero est
Instalación eléctrica
Instrumentos
Edificio y servicios en
Excavación y prepara
Auxiliares
Total planta física

Gastos de campo
Ingeniería
Costos directos de

Honorarios, gastos ind
Contingencias (impre
C_{FC}: inversión tota

TABLA 25-51 I

Erección en el campo básico

Cimientos y soportes rales para el equip

Tubería, incluso du aislamiento

Aislamiento sólo d

Aislamiento sólo d

Exponente
0.45
0.56
0.60
0.92
0.65
0.81
0.30
0.67
0.50
0.46
0.65
0.84
0.59
0.52
0.56
0.79
0.66
0.39
0.81
0.50
0.43
0.26
0.57
0.55
0.48
0.59
0.78
0.48
0.56
0.77
1.33
0.62
0.53
0.73
0.62
1.00
0.57
0.30
0.57
0.50
1.00

TABLA 25-50 Factores para convertir los costos del equipo entregado a inversión en capital fijo

	Plantas nuevas			Instalaciones en límites de batería		
Partidas	Procesamiento de sólidos	Procesamiento de sólidos y fluidos	Procesamiento de fluidos	Procesamiento de sólidos	Procesamiento de sólidos y fluidos	Procesamiento de fluidos
Equipo, entregado	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Instalado	0.19–1.23	0.39–0.43	0.76	0.45	0.39	0.27–0.47
Tubería	0.07–0.23	0.30–9.39	0.33	0.16	0.31	0.66–1.20
Cimientos de acero estructural, concreto reforzado			0.28			0 –0.13
Instalación eléctrica	0.13–0.25	0.08–0.17	0.09	0.10	0.10	0.09–0.11
Instrumentos	0.03–0.12	0.13	0.13	0.09	0.13	
Edificio y servicios en límites de batería	0.33–0.50	0.26–0.35	0.45	0.25	0.39	0.18–0.34
Excavación y preparación del sitio	0.03–0.18	0.08–0.22	. . . .	0.13	0.10	0.10
Auxiliares	0.14–0.30	0.48–0.55	Incluidos arriba	0.40	0.55	0.70
Total planta física	2.37	2.97	3.04	2.58	2.97	3.50
Gastos de campo	0.10–0.12	0.35–0.43	. . . .	0.39	0.34	0.41
Ingeniería	. . . .	0.35–0.43	0.41	0.33	0.32	0.33
Costos directos de planta	2.48	3.73	3.45	3.30	3.63	4.24
Honorarios, gastos indirectos y utilidad de contratista	0.30–0.33	0.09–0.17	0.17	0.17	0.18	0.21
Contingencias (imprevistos)	0.26	0.39	0.36	0.34	0.36	0.42
C_{FC}: inversión total en capital fijo	3.06	4.27	3.98	3.81	4.17	4.87

TABLA 25-51 Método de factores de Miller (basado en costos de equipo entregado = 100)*

		Costos en límites de batería (rango de factores en porcentaje del equipo básico); costo unitario promedio del equipo principal (MPI)						
		Menos de \$3 000	\$3 000 a \$5 000	\$5 000 a \$7 000	\$7 000 a \$10 000	\$10 000 a \$13 000	\$13 000 a \$17 000	Más de \$17 000
Erección en el campo del equipo básico	Alto porcentaje de equipo requiere mucha mano de obra	23/18	21/17	19.5/16	18.5/15	17.5/14.2	16.5/13.5	15.5/13
	Equipo promedio (acero dulce)	18/12.5	17/11.5	16/10.8	15/10	14.2/9.2	13.5/8.5	13/8
	Alto porcentaje de materiales contra corrosión y otro equipo de alto costo unitario que requiere poca erección en el campo	12.5/7.5	11.5/6.7	10.8/6	10/5.5	9.2/5.2	8.5/5	8/4.8
Cimientos y soportes estructurales para el equipo	Alto predominio de compresores o equipo de acero dulce que requieren cimientos fuertes			17/12	15/10	14/9	12/8	10.5/6
	Promedio para equipo fabricado de acero dulce, para sólidos			12.5/7	11/6	9.5/5	8/4	7/3
	Promedio para predominio de equipo fabricado de aleación y otro costo unitario alto	7/3	8/3	8.5/3	7.5/3	6.5/2.5	5.5/2	4.5/1.5
	Equipo de poca altura, más o menos sobre el piso	5/0	4/0	3/0	2.5/0	2/0	1.5/0	1/0
	Piloteo o excavación en roca	Aumentar valores anteriores entre 25 y 100%						
Tubería, incluso ductos sin incluir aislamiento	Alto: gases y líquidos, petroquímicos, plantas con muchos ductos	105/65	90/58	80/48	70/40	58/34	50/30	42/25
	Promedio para plantas químicas: líquidos, electrolíticas	65/33	58/27	48/22	40/16	34/12	30/10	25/9
	Líquidos y sólidos	33/13	27/10	22/8	16/6	12/5	10/4	9/3
	Bajo: sólidos	13/5	10/4	8/3	6/2	5/1	4/0	3/0
Aislamiento sólo del equipo	Muy alto: mucho equipo de acero dulce que requiere aislamiento y temperaturas muy bajas	13/10	11.5/8.5	10/7.4	9/6.2	7.8/5.3	6.8/4.5	5.8/3.5
	Alto: mucho equipo que requiere aislamiento y altas temperaturas (petroquímicos)	10.3/7.5	9/6.3	7.8/5.2	6.7/4.2	5.7/3.4	4.7/3.8	4.8/2.5
	Promedio para plantas químicas	7.8/3.4	6.5/2.6	5.5/2.1	4.5/1.7	3.6/1.4	2.9/1.1	2.2/.8
	Bajo	3.5/0	2.7/0	2.2/0	1.8/0	1.5/0	1.2/0	1/0
Aislamiento sólo de tuberías	Muy alto: mucha tubería de acero dulce que requiere aislamiento y temperaturas muy bajas	22/16	19/13	16/11	14/9	12/7	9/5	6/3.5
	Alto: mucha tubería que requiere aislamiento y temperaturas altas (petroquímicos)	18/14	15/12	13/10	11/8	9/6	7/4	4.5/2.5
	Promedio para plantas químicas	16/12	14/10	12/8				
	Bajo	14/8	12/6	10/5				

TABLA 25-51 Método de factores de Miller (basado en costos de equipo entregado = 100)* (*Continúa*)

		Costos en límite de batería (rango de factores en porcentaje del equipo básico); costo unitario promedio del equipo principal (MPI)						
		Menos de $3 000	$3 000 a $5 000	$5 000 a $7 000	$7 000 a $10 000	$10 000 a $13 000	$13 000 a $17 000	Más de $17 000
Toda la instalación eléctrica excepto iluminación de edificios e instrumentos	Plantas electrolíticas, incluso equipo de rectificación		55/42	50/38	45/33	40/30	35/26	
	Plantas con equipo de acero dulce, máquinas grandes, para sólidos	26/17	22.5/15	19.5/12.5	17/10	14/8.5	12/7	10/6
	Plantas con equipo de aleación o alto costo unitario; químicas y petroquímicas	18/9.5	15.5/8.5	13/6.5	11/5.5	9/4.5	7.3/3.5	6/2.5
Instrumentos **	Muchos instrumentos, tableros centrales de control; petroquímicos		58/31	46/24	37/18	29/13	23/10	18/7
	Plantas para diversos productos		32/13	26/10	20/7	15/5	11/3	8/2
	Pocos instrumentos; para sólidos		21/9	17/7	13/5	10/3	7/2	5/1
Diversos, incluso preparación del sitio, pintura y otros conceptos no incluidos antes	Límite superior: procesos grandes y complicados; límite inferior, procesos sencillos y pequeños	Rango para todos los valores de equipo básico es de 6 a 1%						

Evaluación de edificio cuando la mayor parte de las unidades de proceso están dentro de edificios

Edificios: arquitectura y estructura; excluye servicios a edificios†

	Alto, acero y ladrillo	Mediano		Económico	Evaluación
Calidad de construcción:	+4	+2		0	
	Equipo de costo unitario muy alto	Casi todo acero de aleación	Materiales mixtos	Acero al carbono, costoso	
Tipo de equipo	−3	−2	−1	0	
	Muy alto	Intermedio		Intemperie	
Presiones de funcionamiento	−2	−1		0	
costo del equipo	Clases de edificios = suma algebraica				

		Costo unitario promedio de MPI						
	Clase de edificio	Menos de $3 000	$3 000 a $5 000	$5 000 A $7 000	$7 000 a $10 000	$10 000 a $13 000	$13 000 a $17 000	Más de $17 000
Costo del proceso	+2	92/68	82/61	74/56	67/49	59/44	52/39	46/33
Unidades dentro del edificio	+1 a −1	72/49	62/43	56/38	51/33	45/29	41/26	36/21
	−2	50/37	44/33	40/29	35/25	30/21	27/18	23/15

Servicios para edificios‡	Alto	Normal	Bajo
Aire comprimido, sólo servicio general	4	$1^1/_2$	0.5
Iluminación	18	9	5
Rociadores	10	6	3
Plomería en general	20	12	3
Calefacción	25	16	8
Ventilación			
Sin aire acondicionado	18	8	0
Con aire acondicionado	45	35	25
Promedio general total§	85	55	20

Los factores anteriores se aplican a los conceptos clasificados como servicios para edificios. No incluyen: 1) servicios fuera del edificio como subestaciones, alcantarillado y tubos externos para agua, que se consideran como fuera del límite de batería y fuera del edificio y 2) servicios para procesos.

*Cortesía de C.A. Miller de Canadian Industries, Inc., y de American Association of Cost Engineers.

NOTA: El costo unitario promedio del equipo principal es el costo total de MPI dividido entre el número total de unidades. Las cifras incluyen hasta 3% para alumbrado exterior BL, que no está incluido en servicios para edificios.

**El costo total de instrumentos no varía mucho según su tamaño y no es fácil calcularlo como porcentaje del equipo básico. Esto ocurre en especial en sistemas de destilación. Si hay duda, se deben hacer cálculos detallados.

†Cuando se conocen las especificaciones y dimensiones del edificio, se recomienda calcular el costo rápido de la construcción, en especial si los edificios son parte importante del costo. Si no se puede hacer un cálculo separado, hay que evaluar los edificios como se indica antes de seleccionar los factores.

‡Los siguientes factores son sólo para edificios de proceso en límites de batería y se expresan como porcentaje de costos de arquitectura e ingeniería. No están en relación con el costo del equipo básico.

§Los totales dan los rangos (gamas) para el tipo de edificio en cuestión y son útiles cuando no se conocen los requisitos de servicios individuales. Los promedios generales no son la suma de cada columna.

TABLA 25-52 C
la tabla 25-50

Componentes (planta e
dos y fluidos)
Equipo entregado
Instalado
Tubería
Instalación eléctrica
Instrumentos
Edificio y servicios en
Excavación y preparac
Auxiliares
Total planta física
Gastos de campo
Ingeniería
Costos directos de l
Honorarios, gastos indi
contratista
Contingencias (impre
Inversión total en c

4. Materiales de
de la planta
5. Fases de oper
6. Expectativa d
tos, inusitadamente
Con un procedim
entrada, varias ecu
del equipo entregad
de inversión en una
división de Σ(C_{EQ})
promedio 21%). El
de −20% a +25%, p
ocho plantas en alg
Método de facto
obra Estos métod
a los descritos, se c
mano de obra. Por e
eficiencia y costos
Bauman (*Fundame*

TABLA 25-53 I
riales y mano de

Equipo entregado
Instalación
Instrumentos instalad
Tubería
Cimientos y acero
Aislamiento y pintur
Instalación eléctrica
Edificio en límites de
Preparación del sitio
Auxiliares
Costo de planta física
Ingeniería y oficina
Gastos de campo
Costo directo de la pl
Honorarios de contra
Contingencias (impr
Costo de capital fijo
*Basado en datos d
Chemical Industry, V
po de acero al carbon

TABLA 25-52 Cálculo con el empleo de los factores de la tabla 25-50

Componentes (planta nueva, para sólidos y fluidos)	Factor supuesto	Costo, $	Porcentaje del total
Equipo entregado	1.00	1 000 000	23.4
Instalado	0.41	410 000	9.6
Tubería	0.34	340 000	8.0
Instalación eléctrica	0.13	130 000	3.0
Instrumentos	0.13	130 000	3.0
Edificio y servicios en límite de batería	0.30	300 000	7.0
Excavación y preparación del sitio	0.15	150 000	3.5
Auxiliares	0.52	520 000	12.2
Total planta física	2.98	2 980 000	69.7
Gastos de campo	0.39	390 000	9.1
Ingeniería	0.39	390 000	9.1
Costos directos de la planta	3.76	3 760 000	87.9
Honorarios, gastos indirectos, utilidad de contratista	0.13	130 000	3.0
Contingencias (imprevistos)	0.39	390 000	9.1
Inversión total en capital fijo	4.28	4 280 000	100.0

4. Materiales de construcción para los componentes principales de la planta

5. Fases de operación de cada componente principal

6. Expectativa de cualesquiera costos iniciales, directos o indirectos, inusitadamente altos o bajos.

Con un procedimiento de 12 pasos que incluyen la información de entrada, varias ecuaciones, gráficas y tablas, se calcula el costo total del equipo entregado $\Sigma(C_{EQ})_{DEL}$. Después, se convierte en un cálculo de inversión en una planta que incluye compra de terreno mediante la división de $\Sigma(C_{EQ})_{DEL}$ entre un solo factor, que va de 15 a 30% (valor promedio 21%). El método es rápido y se dice que tiene una exactitud de −20% a +25%, pero sólo se ha probado con el empleo de datos de ocho plantas en algunas publicaciones.

Método de factores múltiples que separan materiales y mano de obra Estos métodos se utilizan cada vez más. Aunque son similares a los descritos, se consideran por separado los costos de materiales y mano de obra. Por ello, es posible tener en cuenta las variaciones en la eficiencia y costos de mano de obra en diferentes zonas o países. H. C. Bauman (*Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964, p. 295) segrega casi todos los datos de la tabla 25-50 en componentes de materiales y mano de obra y expone los datos como rangos y medianas del porcentaje de la inversión total en capital fijo. Los datos de Bauman se han convertido a factores del costo del equipo entregado para una planta construida en terreno baldío (Tabla 25-53).

TABLA 25-53 Factores típicos con separación de materiales y mano de obra*

	Factor total	Factor de materiales	Factor de mano de obra
Equipo entregado	1.00		
Instalación	0.09		0.09
Instrumentos instalados	0.13	0.09	0.04
Tubería	0.29	0.155	0.135
Cimientos y acero	0.18	0.08	0.10
Aislamiento y pintura	0.11	0.025	0.085
Instalación eléctrica	0.18	0.06	0.12
Edificio en límites de batería	0.21	0.13	0.08
Preparación del sitio	0.08		
Auxiliares	0.55		
Costo de planta física	2.82		
Ingeniería y oficina matriz	0.31	0.01	0.30
Gastos de campo	0.43	0.30	0.13
Costo directo de la planta	3.56		
Honorarios de contratista	0.17		
Contingencias (imprevistos)	0.39		
Costo de capital fijo	4.12		

*Basado en datos de H. C. Bauman, *Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964, p. 295, para equipo de acero al carbono.

TABLA 25-54 Factores de ubicación para plantas de productos químicos con funciones similares (valores de 1977)

Ubicación	Factor (Gran Bretaña = 1.0)	Factor (Estados Unidos = 1.0)
África Central	2.0	2.0
África del Norte: elemento importado	1.2	1.1
elemento nativo	0.8	0.75
América Central	1.1	1.0
América del Sur, parte norte	1.5	1.35
América del Sur, parte sur	2.5	2.25
Australia	1.4	1.3
Austria	1.1	1.0
Bélgica	1.1	1.0
Canadá	1.25	1.15
China: elemento importado	1.2	1.1
elemento nativo	0.6	0.55
Dinamarca	1.1	1.0
España: elemento importado	1.3	1.2
elemento nativo	0.8	0.75
Estados Unidos	1.1	1.0
Finlandia	1.3	1.2
Francia	1.05	0.95
Gran Bretaña	1.0	0.9
Grecia	1.0	0.9
Holanda	1.1	1.0
India: elemento importado	2.0	1.8
elemento nativo	0.7	0.65
Irlanda	0.9	0.8
Italia	1.0	0.9
Japón	1.0	0.9
Malasia	0.9	0.8
Medio Oriente	1.2	1.1
Noruega	1.2	1.1
Nueva Zelandia	1.4	1.3
Portugal	0.8	0.75
Rep. Federal Alemana	1.1	1.0
Sudáfrica	1.25	1.15
Suecia	1.2	1.1
Suiza	1.2	1.1
Terranova	1.3	1.2
Turquía	1.1	1.0
Yugoslavia	1.0	0.9

NOTAS:

1. Aumentar un factor de 10% por cada 1000 millas o fracción desde la planta nueva hasta un centro importante de manufactura o importaciones o ambos.
2. Cuando los materiales, la mano de obra o ambos de obtienen en más de una sola fuente, prorratear los factores correspondientes.
3. No se han tenido en cuenta los incentivos a la inversión.

A. V. Bridgwater [*Chem. Eng.*, **86**, 119-121 (noviembre 5, 1979)] presentó un estudio de las variaciones en los costos de capital según la zona geográfica. Mencionó que, debido a las condiciones del comercio y la competencia, los costos del equipo básico no tienen variaciones importantes en los países industrializados occidentales. Las principales diferencias en los costos de construcción en diversos países se deben a variaciones en los costos y productividad de la mano de obra, el empleo de equipo especial y diversos factores locales. En la tabla 25-54 se presentan factores por ubicación para la construcción de plantas de productos químicos con funciones similares en diversos países (valores de 1977). Bridgwater corrigió los factores por las variaciones locales en costos y eficiencia de mano de obra y los convirtió a un valor promedio del tipo o tasa de cambio.

Métodos de factores con el sistema modular Se utilizan para calcular el costo de las principales unidades del equipo y los han preparado diversos autores. Uno de los más completos es el expuesto por K. M. Guthrie [*Chem. Eng.*, **76**, 114-142, (marzo 24, 1969)]. En la tabla 25-55 se presentan los factores promedios para los componentes principales basados en el costo $(C_{EQ})_{FOB}$ para componen-

TABLA 25-55 Factores para partidas individuales*

		Intercambiadores de calor		Recipientes				
Componentes	Hornos	Casco y tubos	Enfriados por aire	Verticales	Horizontales	Bomba y propulsor	Compresor y propulsor	Tanques
Equipo FOB	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Tuberías	0.18	0.46	0.18	0.61	0.42	0.30	0.21	
Concreto	0.10	0.05	0.02	0.10	0.06	0.04	0.12	
Acero	....	0.03	....	0.08				
Instrumentos	0.04	0.10	0.05	0.12	0.06	0.03	0.08	
Instalación eléctrica	0.02	0.02	0.12	0.05	0.05	0.31	0.16	
Aislamiento	....	0.05	....	0.08	0.05	0.03	0.03	
Pintura	....	....	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Total de materiales = M	1.34	1.71	1.38	2.05	1.65	1.72	1.61	1.20
Erección y colocación (L)	0.30	0.63	0.38	0.95	0.59	0.70	0.58	0.13
X, excepto preparación del sitio y auxiliares ($M + L$)	1.64	2.34	1.76	3.00	2.24	2.42	2.19	1.33
Fletes, seguros, impuestos, ingeniería, oficina matriz, construcción	....	0.08	....	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Gastos indirectos o de campo	0.60	0.95	0.70	1.12	0.92	0.97	0.97	
Factor total del módulo	2.24	3.37	2.46	4.20	3.24	3.47	3.24	1.41

*De K. M. Guthrie, *Chem. Eng.*, **76**, 114-142 (marzo 24, 1969). Basados en costo de equipo FOB = 100 (acero al carbono).

tes de acero al carbono. Al costo FOB del componente se agrega, por medio de factores, el costo total de materiales para completar el módulo M. Los costos L de erección e instalación se suman como factor o se calculan con la relación de costo L/M para dar $M + L = X$, que es el costo directo del módulo. Los costos indirectos como fletes, impuestos, seguros, ingeniería y gastos de campo se suman a $(M + L)$ para dar el costo total del módulo, el cual no incluye contingencias, honorarios de contratistas, servicios auxiliares, preparación del sitio, terrenos y edificios industriales, que se tendrán que agregar en su caso. Los factores de la tabla 25-55 se basaron en los precios a mediados de 1968 para una planta en la zona del Golfo de México en Estados Unidos.

A. Pikulik y H. E. Diaz [*Chem. Eng.*, **84**, 106-122 (octubre 10, 1977)] presentaron un método de gráficas para calcular el costo de fabricación de columnas de destilación y recipientes de presión, tanques de almacenamiento, calentadores con fuego directo, bombas y unidades motrices, compresores y sus unidades motrices, y el equipo para vacío.

Cálculo de las tuberías El costo de fabricación e instalación de las tuberías en una planta de proceso parece ser entre 18 y 61% del costo FOB del equipo, como se indica en la tabla 25-55. Esto representaría alrededor de 7 a 15% del costo de la planta instalada y es una partida importante. Los métodos disponibles para cálculo de las tuberías son:

1. Precios detallados según los planos de tubería
2. Método de Guthrie
3. Método N de Dickson
4. Precio por peso de tipos específicos de tubería

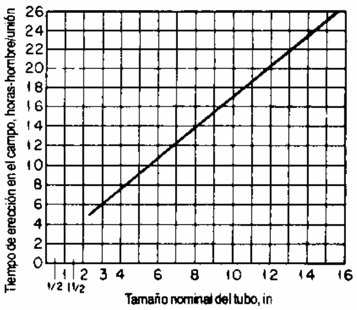


FIG. 25-42 Horas de mano de obra requeridas para erigir grandes cantidades de tubo mecánico de acero y de baja aleación.

5. Cálculo de precio por costo por unión
6. Precio como factor del costo del equipo
7. Precio como factor del costo total instalado de la planta

Los primeros cinco métodos sólo se pueden aplicar después de un riguroso análisis de los circuitos y cuando se tienen planos de instalación e isométricos o maquetas de la tubería para el cálculo por cantidad (por ejemplo, tamaño, longitud y especificaciones de la tubería, número de bridas y válvulas, etc.)

El método de Guthrie [K. M. Guthrie, *Chem. Eng.*, **76**, 201-216 (abril 14, 1969)] es a base de gráficas y emplea costos promedio de mediados de 1968 para una planta en la zona del Golfo de México en Estados Unidos.

El método N de Dickson [R. A. Dickson, *Chem. Eng.*, **54**, 121-123 (noviembre 1947)] es una variante del método de cálculo por cantidad. Se determina el precio total de diversos circuitos de cada tipo de tubería para un tamaño base. En otra gráfica se presenta un factor N para otros tamaños de tubería. Al multiplicar el costo del circuito con el tamaño base por el factor N aplicable, se tiene el costo estimado del nuevo circuito del tamaño de tubería deseado. El método depende, para su exactitud, de volver a aplicar nuevos precios en forma periódica a los circuitos del tamaño base para que las gráficas básicas estén actualizadas.

El cálculo por peso requiere calcular todas las cantidades, incluso los pesos y datos completos de los costos anteriores sobre la misma base. Su única ventaja es el tiempo que se ahorra en los cálculos detallados del costo de los componentes de la tubería.

El cálculo por costo por unión depende de la disponibilidad de datos previos, analizados y correlacionados para su empleo. La ventaja de este método es que se pueden utilizar diagramas de flujo de ingeniería para el cálculo.

TABLA 25-56 Componentes del costo total instalado de la tubería

Material	Tubos, válvulas, accesorios, tuercas, tornillos, juntas y soportes
Mano de obra	Cortar, erigir, alinear, ajustar, atornillar, soldar o roscar, probar
Costos indirectos	Manejo y acarreo, almacenar, andamios, tiempo perdido, herramientas y alquileres, gastos indirectos y utilidad del contratista
Factores aplicables a la mano de obra	Salario por especialidad, productividad, altura y complejidad
Mano de obra especializada para erección de tubería	Tuberos, peones, carpinteros, almacenistas, choferes y ayudantes, ingenieros de operaciones

En la figura 25-42 a
obra para instalación
minal de tubo mecán
unidad de medición d
requieren dos unione
"tes", etc., ya que la c
instalación de tubería
cionales de manejo, s
en su lugar están incl
En la figura 25-42
material se deben obt
en que aparezcan tod
Para calcular los tran
nos y elevaciones pa
el empleo de costos
costo de mano de ob
aplicables a la man
análisis de datos est
bajos terminados a f
yectos en diversos l
Los métodos 6 y 7
para calcular los co
flujo ni planos detall
y 25-55 se incluyen
el costo total del equ
en particular. Estos
el factor apropiado,
costos de tubería co
E. S. Sokullu [Ch
bió un método apro
centaje del costo to
equipo, sin incluir
en donde ϕ_P = (núm
de componentes m
El método por u
más exactitud que l
cidos. Requiere la
tamaños del equip
lor, evaporadores,
tubería para un eq
yectos. El análisis
con los métodos d
en la mayor parte
una pequeña prop
una longitud prom
costos reales de t
corrección por las
diante un solo ín
métodos 1 a 5.
La mayor parte
descritos, con exc
que se calculen c
carbono. En la tab
costos de acero al
algunos equipos. (
ting, Institution of
Cálculo de in
suelen ser de 4 a 1
de la mediana de
ría, el diseño del
planos y especific
go, los costos rea
mayores que los
de exactitud dent

En la figura 25-42 aparece un trazo del número de horas de mano de obra para instalación por unión en el campo en contra del tamaño nominal de tubo mecánico de acero al carbono y de baja aleación. La unidad de medición del trabajo en este método es la unión de tubo y se requieren dos uniones para acoplamientos y válvulas, tres para las "tes", etc., ya que la casi totalidad de las horas de mano de obra para la instalación de tubería se dedican a hacer conexiones. Los costos adicionales de manejo, suspensión y colocación de los tramos de tubería en su lugar están incluidos en la gráfica.

En la figura 25-42 sólo se dan horas de mano de obra. Los costos de material se deben obtener con el cálculo por cantidad a partir de planos en que aparezcan todas las conexiones para válvulas e instrumentos. Para calcular los tramos y accesorios de la tubería se consultan los planos y elevaciones para el equipo. Esta gráfica se puede actualizar con el empleo de costos reales para un trabajo específico, en cuyo caso el costo de mano de obra por unión es el total e incluye todos los factores aplicables a la mano de obra de la tabla 25-56. Debe ser posible el análisis de datos estadísticamente uniformes de cierto número de trabajos terminados a fin de determinar el valor de cada factor para proyectos en diversos lugares.

Los métodos 6 y 7 son más sencillos y en ellos se emplean factores para calcular los costos de tubería cuando no se tienen diagramas de flujo ni planos detallados de tubería. En las tablas 25-50, 25-51, 25-53 y 25-55 se incluyen valores típicos de factores para tubería basados en el costo total del equipo, detallado o FOB, según se indique en la tabla en particular. Estos métodos requieren buen criterio para seleccionar el factor apropiado, con base en la experiencia lograda al comparar costos de tubería con los de plantas de proceso similares existentes.

E. S. Sokullu [*Chem. Eng.*, **76**, 148-150, (febrero 10, 1969)] describió un método aproximado para calcular el factor de tubería como porcentaje del costo total entregado de los componentes principales del equipo, sin incluir instrumentos y equipo eléctrico, en la forma de:

$$f_P = 11\phi_P^{1.8} \quad (25\text{-}249)$$

en donde ϕ_P = (número real de tubos en el diagrama de flujo)/(número de componentes mayores del equipo).

El método por unidades o componentes del equipo parecería lograr más exactitud que los ya descritos, en particular en procesos no conocidos. Requiere la acumulación de los costos de tuberías para diversos tamaños del equipo principal, como bombas, intercambiadores de calor, evaporadores, tanques y columnas. Se supone que los diseños de tubería para un equipo específico son similares en casi todos los proyectos. El análisis estadístico de esos datos indica buena concordancia con los métodos detallados de precios por cantidad de material. Como en la mayor parte de los procesos la longitud de la tubería utilizada es una pequeña proporción del costo total de la tubería, la suposición de una longitud promedio de tubería por equipo principal, con base en los costos reales de trabajos anteriores, permitirá suficiente exactitud. La corrección por las escalaciones en los costos se puede efectuar mediante un solo índice de costos, al contrario de lo que ocurre con los métodos 1 a 5.

La mayor parte de los métodos de factores para los cálculos antes descritos, con excepción del método de Allen y Page (*loc. cit.*), hacen que se calculen costos basados en equipo o instalaciones de acero al carbono. En la tabla 25-57 se presentan factores típicos para convertir costos de acero al carbono a los equivalentes de acero de aleación en algunos equipos. (Está adaptada de *A New Guide to Capital Cost Estimating*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1977, p. 18.)

Cálculo de instalación eléctrica e instrumentos Estos costos suelen ser de 4 a 10% del costo total instalado de la planta, con un valor de la mediana de alrededor de 7.5%. Igual que en los cálculos de tubería, el diseño del proceso debe estar terminado antes de poder preparar planos y especificaciones detallados para fines de cálculos. Sin embargo, los costos reales de la instalación eléctrica pueden ser hasta 100% mayores que los costos calculados y es importante mantener el rango de exactitud dentro de límites razonables.

TABLA 25-57 Factores típicos para convertir costo de acero al carbono a costo equivalente de acero de aleación

Material	Bombas, etc.	Otro equipo
Todo en acero al carbono	1.00	1.00
Acero inoxidable, tipo 410	1.43	2.00
Acero inoxidable, tipo 304	1.82	2.50
Acero inoxidable, tipo 316	2.00	2.86
Acero inoxidable, tipo 310	2.00	3.33
Acero forrado con caucho	1.43	1.25
Bronce	1.54	
Monel	3.33	

Material	Intercambiadores de calor
Casco y tubos de acero al carbono	1.00
Casco de acero al carbono, tubos de aluminio	1.25
Casco de acero al carbono, tubos de Monel	2.08
Casco de acero al carbono, tubos de inoxidable 304	1.67
Casco y tubos de acero inoxidable 304	2.86

Durante las etapas de diseño, los cambios frecuentes en el tipo y tamaños del equipo demoran el establecimiento de los requisitos de electricidad. Por ello, es muy difícil obtener un cálculo detallado de la parte eléctrica del proyecto. Para cálculos de orden de magnitud y para estudio se puede utilizar un factor entre 4 a 10% del costo instalado total de la planta. Sin embargo, en los cálculos para aprobación del presupuesto o preliminares que requieren una exactitud con aproximación del 5%, se necesitan métodos más precisos.

Los métodos disponibles para los cálculos de la instalación eléctrica son:

1. Cantidad detallada de materiales
2. Costo por factores como porcentaje del costo total instalado de una planta específica
3. Precios unitarios

El método por cantidad detallada de materiales rara vez se puede utilizar. Si se tienen planos detallados, se pueden calcular los costos con los precios de materiales y componentes en los catálogos de los proveedores o, para equipos especiales, mediante cotizaciones. Existen manuales que indican las horas de mano de obra requeridas usualmente para efectuar unidades del trabajo de instalación, como las instalaciones de interruptores, arrancadores, motores, alambrado de conduits e interruptores de botones de diversos tamaños, para zonas peligrosas y no peligrosas. Los salarios de mano de obra en la zona se pueden encontrar en las publicaciones estadísticas. En Estados Unidos, National Electrical Contractors Association publica un manual detallado de los costos de equipo e instalaciones eléctricas. A partir de los planos y especificaciones completos, el calculista puede conocer los materiales, calcular el costo de mano de obra, aplicar los factores correspondientes de eficiencia y productividad de la mano de obra y para las condiciones locales y obtener buenos resultados.

El cálculo con factores, si está basado en datos reales probados, da buenos resultados y a menudo es adecuado en la etapa de los cálculos preliminares. Es esencial acopiar datos, de experiencias pasadas, que indiquen los costos eléctricos reales: **1**) como porcentaje del costo total instalado de la planta y **2**) como porcentaje de los costos del equipo instalado. H. C. Bauman en estudios de instalaciones eléctricas de más de 100 plantas (*Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964, p. 134) mencionó

TABLA 25-58 Instalación eléctrica e instrumentos como porcentaje del costo total instalado de la planta

	Instalación eléctrica (proceso y servicio)		Instrumentos	
Tipo de planta	Rango, %	Mediana	Rango, %	Mediana, %
Para sólidos	3.7–10.7	5.4	0.3–6.0	0.8
Planta nueva	4.0–7.9	5.9	1.9–4.3	3.2
Límites de batería	4.3–10.1	7.5	0.1–7.9	3.7

TABLA 25-59 Costo de componentes eléctricos como porcentaje del costo total del sistema eléctrico

Componente	Rango, %	Mediana, %
Cableado para potencia	25–50	40
Iluminación	7–25	12
Transformación y servicio	9–65	40
Alambrado para instrumentos	3–8	5

que los costos eléctricos eran de 4 a 11% del costo total de la planta, con una mediana de 7.5% para plantas de proceso en los límites de batería. Los costos correspondientes con base en el costo del equipo instalado fueron de 15 a 40%, con una mediana de 26%. Por ello, parece que hay mejor correlación entre los costos de la instalación eléctrica y el costo total de la planta instalada que con los costos del equipo instalado. La tabla 25-58, tomada de los datos de Bauman, da valores típicos de costos eléctricos como porcentaje del costo total instalado de la planta. En esa tabla también se incluyen las gamas de costos para instrumentos instalados, pues forman parte del costo de la instalación eléctrica. La gama de valores es muy amplia, según el grado de control automático requerido.

Los costos de instalación eléctrica incluyen cuatro componentes principales: **1**) alambrado para potencia, **2**) iluminación, **3**) transformación y servicio (alimentación), **4**) alambrado para instrumentos y controles. En la tabla 25-59 se presenta un desglose de estos componentes del costo como porcentaje del costo eléctrico total.

El método de costo unitario permite un cálculo rápido y exacto, siempre y cuando esté basado en datos acopiados en muchas instalaciones en diversos tipos de plantas. Hay que analizar los datos reales para tener información del costo unitario de los siguientes componentes eléctricos:

1. Costo total instalado por motor
2. Costo total instalado por lámpara, por tipo
3. Costo total instalado de los enchufes (*sockets*), por tipo (incandescentes, fluorescentes, etc.)
4. Costo total instalado de cada punto con instrumentos alambrados
5. Costo total instalado por cada unidad de transformación
6. Costo total instalado por pie lineal de distribución, por tipo (elevada desnuda y aislada, ductos subterráneos).
7. Costo total instalado de cada punto de interconexión

Cada costo unitario incluye todos los requeridos para la instalación de esa unidad. El costo instalado de los motores incluye arrancador, conduits, cableado y una parte proporcional del tablero de distribución y barras de distribución. No se incluye el costo del motor porque será parte del equipo. En el caso del alumbrado, el costo instalado incluye las diversas lámparas, *conduit* y alambres y una parte proporcional del tablero de distribución e interruptores generales para alumbrado.

Cálculo de servicios auxiliares Los servicios auxiliares en las plantas de procesos químicos suelen incluir todas las estructuras, equipo y servicios que no son parte directa del proceso. En esta clasificación tan general hay dos principales: servicios generales e instalaciones para servicios.

La gama típica de costos para los servicios auxiliares es de 20 a 40% del costo total de la planta instalada. En una planta pequeña, de proceso continuo que haga un solo producto, el valor será en el punto inferior; en una planta grande, con procesos múltiples, el valor estará cerca del punto superior.

Edificios auxiliares En la tabla 25-60 se presentan las variaciones típicas en el costo de edificios y servicios auxiliares para muchas plantas de proceso. Las variaciones más grandes ocurren en los edificios auxiliares, lo que no es sorprendente, por los muchos tipos y calidades de materiales y variaciones en los métodos de construcción. Por ejemplo, los edificios para uso general como oficinas, cafetería, servicio médico, casetas de vigilancia y cuartos de control necesitan muros de tabique con recubrimiento de yeso o similar. Por otra parte, las instalaciones para servicios como subestaciones, cuartos de interruptores y casetas para bombas o compresores costarían de 5 a 10% menos. El

TABLA 25-60 Rangos típicos de instalaciones auxiliares como porcentajes del costo total instalado de la planta

	Planta nueva y adiciones grandes	
	Rango, %	Mediana, %
Edificios auxiliares	3–9	5.0
Generación de vapor	2.6–6	3.0
Refrigeración, incluso distribución	1–3	2.0
Suministro, enfriamiento y bombeo de agua	0.4–3.7	1.8
Almacenamiento de producto terminado	0.7–2.4	1.5
Sistemas de agua para proceso	0.4–1.8	1.1
Almacenamiento de materia prima	0.3–3.2	1.1
Distribución de vapor	0.2–2	1.0
Distribución eléctrica	0.4–2.1	1.0
Compresión y distribución de aire	0.2–3.0	1.0
Distribución de agua	0.1–2	0.9
Sistema de protección contra incendio	0.3–1.0	0.7
Tratamiento de agua	0.2–1.1	0.6
Vías férreas	0.3–0.9	0.6
Caminos y andadores	0.2–1.2	0.6
Suministro y distribución de gas	0.2–0.4	0.3
Drenaje de aguas negras	0.1–0.4	0.3
Comunicaciones	0.1–0.3	0.2
Iluminación de patios y alambradas	0.1–0.3	0.2

aire acondicionado, mobiliario y equipo para cafetería, laboratorio y oficinas aumentarían en alrededor de 50% al costo básico del edificio.

Instalaciones para generación de vapor Ocupan el segundo lugar en importancia de la inversión en equipo auxiliar para una planta de productos químicos. Las variaciones en la capacidad, instalación en su propio local o dentro de la planta, el tipo de combustible, las presiones y temperaturas requeridas y el tipo de proceso que se alimentará tienen un efecto importante sobre el costo real y con respecto al costo de otros servicios auxiliares. Se pueden comprar calderas unitarias ("en paquete") listas con las conexiones para tubos y eléctricas y que se montan en los cimientos en su sitio. Están disponibles en capacidades hasta de 136 000 kg/h (300 000 lb/h) aunque los generadores para más de unos 45 360 kg/h (100 000 lb/h) sólo se entregan para acabar de ensamblarlos en el sitio. Suele ser necesario obtener cotizaciones en firme que incluyan todos los factores. Si los generadores de vapor se instalan dentro del edificio general, el costo aumentará entre 7 y 9% por kilogramo-hora (15 a 20% por libra-hora) de capacidad de generación de vapor, en relación con el costo de instalar en la casa de calderas o en un edificio existente.

En la mayor parte de las plantas de productos químicos, el vapor para proceso está a presiones de 1.825 MN/m^2 (250 psig), saturado o menores. Cuando se justifica económicamente la cogeneración de vapor y energía eléctrica, se puede generar vapor a unos 5.96 MN/m^2 (850 psig) con el supercalentamiento requerido y se utiliza para impulsar turbinas de contrapresión que distribuyen el vapor para proceso a la presión necesaria.

Electricidad Se suele contar con suministro adecuado de electricidad con empresas gubernamentales o privadas. Debido al creciente costo de la electricidad comprada, muchas empresas han estudiado los aspectos económicos de instalar sistemas combinados para generación de vapor y electricidad. Una instalación para cogeneración puede: **1**) ser propiedad y operada por el usuario industrial o la empresa eléctrica; **2**) servir a más de un usuario industrial o **3**) formar parte de la generación para servicio local. Un estudio [J. Javetski, *Power*, **122**, 35-40, (abril, 1978)] indicó que los costos usuales de vapor para cogeneración, en Estados Unidos durante 1982, serían de $11.42 por 1000 kg ($5.18 por 1000 lb) después de deducir $2.82 por 1000 kg ($1.28 por 1000 lb) de vapor como crédito por la electricidad producida. En esas cifras se supuso el empleo de carbón del oeste de Estados Unidos con valor térmico de 18.6 a 19.8 MJ/kg (8000 a 8500 Btu/lb), con contenido de azufre menor de 0.5%.

En la mayor parte de las plantas, el sistema de distribución eléctrica empieza en la conexión con la red de potencia de la empresa eléctrica. La selección del sistema de distribución eléctrica dependerá de mu-

chos factores como el peligro de rayos y otras condiciones ambientales. Por ello, quizá se empleen sistemas de distribución elevados o subterráneos. Un sistema elevado o aéreo cuesta sólo 30 a 50% del costo de uno subterráneo. El sistema en sí incluye la subestación principal, subestaciones de distribución, alimentadores, interruptores y equipo auxiliar.

Para claros de 30.5 m (100 ft), los sistemas aéreos con cable aéreo aislado soportado sobre cables mensajeros tendidos entre postes de madera cuestan entre $97 y $125 por metro ($30 a $38 por pie) de línea de poste instalados, a los precios de 1979, según sea el tamaño del conductor, que puede ser desde No. 6 AWG (4.1 mm de diámetro) hasta 500 000 circular mils (18 mm de diámetro). Para esos tamaños, un sistema equivalente de conductores desnudos con postes de madera, que incluya apartarrayos en cada segundo poste, costaría de $27 a $84 por metro ($8 a $26 por pie) de línea elevada instalada.

Los sistemas subterráneos requerirían grupos de ductos de fibra enclavados en concreto, pozos de visita, subestaciones y cables aislados, que costarían de $350 a $840 por metro instalado ($110 a $255 por pie), según el número de ductos en cada grupo, la longitud del sistema, el voltaje y la capacidad y las condiciones del suelo y del clima. El costo de la distribución subterránea exclusivamente, con ductos de fibra enclavados en concreto tendidos en un suelo promedio y que incluya pozos de visita, sin subestaciones, es entre $210 y $350 por metro ($65 a $105 por pie) de grupo de ductos. A veces, se puede utilizar cable blindado sepultado. Los costos de este sistema, sin subestaciones, van de $85 a $175 por metro ($25 a $55 por pie). Las subestaciones, según el tipo, capacidad y voltaje, cuestan alrededor de $55 a $130 por kilovolt-ampere (kVa) instalado; los anteriores son precios de 1979 (M & S = 600).

Sistemas de agua Suelen ser el tercer concepto de costos, en orden de importancia para los servicios auxiliares de la planta, y las torres de enfriamiento representan la mayor parte de la inversión. Aunque el costo instalado aumenta según las temperaturas que se deben controlar, una correlación aproximada de costo se expresa con

$$C_{CT} = 100q^{0.87} \qquad (25\text{-}250)$$

en donde C_{CT} es el costo instalado de la torre de enfriamiento, en dólares U.S. para un índice Marshall & Swift (M & S) de 1000 y q es la capacidad en galones U.S. por minuto, para capacidades desde $(1)(10^3)$ hasta $(1)(10^5)$ galones U. S. por minuto.

Se puede lograr una correlación aproximada para las instalaciones de bombeo y filtrado de agua de ríos mediante

$$C_{RW} = 0.65q^{0.81} \qquad (25\text{-}251)$$

en donde C_{RW} es el costo instalado del sistema para agua de río, en dólares U.S., para un índice M & S de 1000 y q es la capacidad en la gama de $(4)(10^5)$ a $(1)(10^7)$ gal/día.

Los costos instalados de los sistemas de suavización o ablandamiento de agua se pueden correlacionar en dólares U.S. (M & S = 1000) como sigue:

$$C_{WS} = 1380q^{0.44} \qquad (25\text{-}252)$$

en la gama de capacidad de $(3)(10^7)$ a $(1)(10^9)$ gal U. S./día y para los sistemas desmineralizadores con

$$C_{DS} = 0.17q^{1.9} \qquad (25\text{-}253)$$

con q en la gama de $(1)(10^4)$ a $(4)(10^5)$ gal. U.S./día. Los costos reales del tratamiento de agua variarán mucho de los anteriores, según sean la calidad del agua, el porcentaje de sólidos disueltos y la dureza total.

Metros lineales	Pies lineales	$ por metro	$ por pie
152–305	500–1000	125.00	39.00
305–915	1000–3000	118.00	36.00
915–3050	3000–10 000	112.00	34.00
Más de 3050	Más de 10 000	105.00	32.00

Sistemas de refrigeración Estos sistemas se utilizan cada vez más en los procesos químicos. El costo instalado de una unidad mecánica integrada, en dólares U.S. (M & S = 1000) se puede correlacionar en forma aproximada mediante

$$C_{RS} = 4630q^{0.73} \qquad (25\text{-}254)$$

en donde q es la capacidad en toneladas de refrigeración en el intervalo de 10 a 1000 toneladas. Una tonelada de refrigeración equivale a una extracción de calor de 3.517 kW (12 000 Btu/h).

Caminos y andadores Es difícil calcular el costo de caminos y andadores en las plantas de productos químicos, porque varían según el tipo de construcción y el espesor de la carpeta aplicada. Algunos costos unitarios típicos para caminos son: grava y asfalto, $10.20 a $12.70 por m² ($8.50 a $10.60 por yd²); concreto con losa de 152 mm (6 in), $12.70 a $15.20 por m² ($10.60 a $12.70 por yd²), concreto con losa de 203 mm (8 in), $15.20 a $19.00 por m² ($12.70 a $15.90 por yd²). Los costos instalados de vías férreas, incluyendo los cambios y los cruceros, se pueden calcular como en la tabla anterior (precios de julio de 1979).

Empleo de computadoras para cálculos de costos Gran parte del cálculo consiste en el acopio y almacenamiento de datos obtenidos de los registros de costos de plantas reales. Después, hay que correlacionar y actualizar estos datos y recuperar la información requerida con rapidez para emplearla en cálculos adicionales de costos. En un estudio muy completo (C. J. Liddle y A. M. Gerrard, *The Application of Computers to Capital Cost Estimation*, Institution of Chemical Engineers, London, 1975, pp. 6-17) se menciona, desde entonces, el creciente empleo de computadoras en las grandes empresas de productos químicos, proveedores de equipo y contratistas, para la recuperación de datos, seguida por correlación simple y la aplicación de los métodos factoriales en el cálculo de costos.

Para los proveedores de equipo, la computadora es de enorme ayuda porque se eliminan los errores de cálculo al hacer sus cotizaciones. Algunas empresas tienen un sistema automatizado para cotizaciones que elimina demoras e inexactitudes al cotizar y presentar ofertas. No se requiere una computadora de gran tamaño y el costo del tiempo es bajo en relación con el de la computadora. Los costos de operación de un sistema automatizado para cotizar pueden ser la mitad que los de un sistema manual. Los métodos de cálculo se basan en los sistemas manuales descritos.

Muchas grandes empresas de productos químicos y petroquímicos han creado paquetes de computadoras basados en métodos manuales, para los cálculos factoriales. Por lo general los datos de entrada son el costo de cada equipo principal (MPI), obtenidos mediante cotizaciones o en los libros de contabilidad. Después, el programa sirve para calcular los costos de erección, tubería, instrumentos, instalación eléctrica, ingeniería civil y aislamiento para cada (MPI) a los cuales agrega una serie de factores. Con esto se tienen en cuenta la complejidad del proceso y las dificultades para construcción del (MPI) para producir un cálculo del costo total de la planta. Por supuesto, se acostumbra agregar índices inflacionarios para actualizar los costos estimados.

En las plantas de proceso se pueden utilizar los programas de cálculo de costos con un programa de diseño o de diagrama de flujo para optimizar un componente particular e incluso toda la planta. (*A New Guide to Capital Cost Estimating*, Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1977, pp. 20-21). Se debe recordar que la optimización requiere bastante tiempo de computadora, aunque no hay datos del ahorro logrado con la computadora en este aspecto. También es posible incorporar el cálculo del costo del capital en una evaluación de la inversión que incluya pronósticos de gastos y de ingresos por ventas; con ello, se pueden reunir el diseño y los costos en la computadora. Hay retroalimentación inmediata de la información que permitirá mejor diseño y menores costos. En algunas plantas se pueden alimentar los datos de costos como subrutina del programa de diseño. En todas estas posibilidades se supone que el costo de empleo de la computadora es razonable.

Costos de puesta en marcha Los problemas con la puesta en marcha (arranque) pueden reducir la utilidad neta después de impuestos durante los primeros años y el efecto más serio es demorar el arranque de la producción, que ocasionará pérdida de utilidades. Un cálculo exacto del tiempo y costo del arranque puede ayudar a **1)** predecir la disponibilidad de nuevos productos, **2)** planear la entrada al mercado, **3)** calcular la rentabilidad total, debido a que se tienen pronósticos de flujo de efectivo y cálculos de (NPV) más exactos. [R. P. Feldman, *Chem. Eng.*, **76**, 87-90 (noviembre 3, 1969)].

Los costos de arranque son el total de costos relacionados directamente con la puesta en funcionamiento de una nueva instalación para producción. No deben incluir el costo de iniciar o ampliar un negocio y, por tanto, incluyen:

1. Todos los gastos debidos a los cambios en el proceso y el equipo después de terminar la construcción, con exclusión de los debidos a cambios en el alcance del proyecto

2. Todos los costos de mano de obra después de concluir la construcción, en especial los incurridos en las pruebas de equipo

3. Todos los costos durante el periodo de arranque, con exclusión de los gastos normales de operación

4. Gastos de adiestramiento del personal de la planta, aunque ocurran antes de empezar oficialmente la puesta en marcha

5. Todos los costos de investigación y desarrollo durante el arranque

Los siguientes gastos *no* se deben incluir:

1. Costos de comercialización

2. Costos de adiestramiento de representantes de ventas

3. Multas adicionales por el empleo de ciertos medios de transporte

4. Costos de organización de una nueva empresa

5. Pérdidas de ventas, salvo que haya un contrato que incluya penalizaciones

6. Pérdida de utilidades por falta de oportunidad

El tiempo para puesta en marcha es el transcurrido entre el final de la construcción y el comienzo del funcionamiento normal. Por tanto, debe empezar a contar cuando el contratista termina toda la planta o una sección determinada de ella, a fin de poder hacer comparaciones con otros tiempos para arranque. Se acostumbra definir el funcionamiento "normal" como: **1)** funcionamiento a cierto porcentaje de la capacidad de diseño, **2)** un número especificado de días de funcionamiento continuo o **3)** la capacidad para hacer productos de una pureza especificada.

Es esencial que los gerentes de proyecto y producción convengan de antemano en la definición que se aplicará. Es importante llegar a un acuerdo de lo que es funcionamiento "normal" porque **1)** establece un objetivo para el personal, **2)** asegura que todos buscarán el mismo objetivo, **3)** permite hacer comparaciones con otras plantas, **4)** determina una fecha para concluir el arranque. Puede ser necesario esperar hasta que la planta ya esté en marcha para obtener el costo real del arranque.

Para fines de control es aconsejable presupuestar el costo y tiempo de arranque y tratar de mantenerse dentro del presupuesto. Los parámetros generales que se pueden utilizar para calcular el costo de puesta en marcha, C_{SU}, que suelen ser entre 2 y 20% del costo de capital fijo en límites de batería, son:

1. Costo directo de capital fijo para la planta (capital en límites de batería), $(C_{FC})_{BL}$.

2. Novedad del proceso y la tecnología, b

3. Novedad del tipo y tamaño del equipo, c

4. Calidad y cantidad de mano de obra, d

5. Dependencia de otras plantas, e

Entonces, el costo de arranque se puede expresar como:

$$C_{SU} = (C_{FC})_{BL}[0.10 + b + c + d + ne] \qquad (25\text{-}255)$$

Cuando se aplican a plantas grandes para separación de aire y amoniaco (1000 a 1400 toneladas métricas/día) se pueden utilizar los siguientes valores para los parámetros:

b =	0.05 para un proceso totalmente nuevo
=	0.02 para un proceso de relativa novedad
=	−0.02 para un proceso antiguo
c =	0.07 si es totalmente nuevo
=	0.04 si es muy nuevo
=	0.02 si es de relativa novedad
=	−0.03 si es antiguo
d =	0.04 si hay gran escasez de mano de obra
=	0.02 si hay escasez de mano de obra
=	−0.1 si hay sobrante de mano de obra
e =	0.04 si la planta depende mucho de otra
=	0.02 si depende en forma moderada de otra
=	−0.02 si es independiente

y

n = número de plantas o secciones que constituyen la cadena del proceso.

El tiempo de arranque t_{SU} para estas plantas se puede calcular a partir del tiempo de construcción t_C, con el establecimiento de una ecuación similar a la (25-255):

$$t_{SU} = t_C(0.15 + b + c + d + ne) \qquad (25\text{-}256)$$

Para el mismo tipo de planta, los valores de los parámetros son:

b =	0.15 para un proceso totalmente nuevo
=	0.05 para un proceso de relativa novedad
=	−0.01 para un proceso antiguo
c =	0.15 si es totalmente nuevo
=	0.08 si es totalmente nuevo
=	0.05 si es de relativa novedad
=	−0.01 si es antiguo
d =	0.15 si hay gran escasez de mano de obra
=	0.05 si hay escasez de mano de obra
=	−0.01 si hay sobrante de mano de obra
e =	0.25 si la planta depende mucho de otra
=	0.10 si la planta depende en forma moderada de otra
=	−0.02 si es independiente

y

n = número de plantas o secciones que constituyen la cadena del proceso.

Se debe tener en cuenta que estos valores están basados en la experiencia en ciertos tipos de plantas, pero se podrían seleccionar valores adecuados aplicables a otros proceso y ubicaciones.

Tiempo de construcción Es difícil calcular la duración de la construcción por el gran número de variables que intervienen. En general, la estimación del tiempo de construcción suele ser muy optimista, en especial para proyectos grandes. Por lo general, los proyectos que cuesten menos de $2 millones a precios de 1979 se pueden concluir entre 10 y 18 meses; los que cuesten más de $10 millones pueden necesitar de 18 a 42 meses. Pueden ocurrir retrasos hasta de 12 meses, en particular si hay problemas laborales o de falta de mano de obra. Como se mencionó, esas demoras suelen aumentar los costos de la construcción. A menudo, un efecto más serio es la pérdida de ingresos por la demora en la puesta en marcha (arranque). Ambos factores alargan el periodo de recuperación y disminuyen el valor presente neto (NPV) y la tasa de retorno o rendimiento con flujo de efectivo descontado (DCFRR) del proyecto.

Control del proyecto Una vez efectuado un cálculo correcto del costo de capital y del tiempo esperado para construcción, es esencial implantar un sistema eficaz para controlar el gasto de tiempo y dinero durante la construcción. Un buen control del costo del capital puede disminuir los gastos aunque el cálculo definitivo no sea muy preciso. Es muy importante que la administración reciba un aviso temprano si es posible que ocurran excesos en los gastos o en el tiempo.

El control eficaz de costos debe empezar desde el comienzo del proyecto en la etapa de investigación y desarrollo y continuar durante las etapas de diseño y cálculo hasta llegar al funcionamiento inicial de la planta (J. W. Hackney, *Control and Management of Capital Projects*, Wiley, New York, 1965, p. 4). Las etapas citadas son las que ocurren después de la autorización de la inversión y durante la construcción del

proyecto. Una vez q
pedidos del equipo y
etapa de la construcci
éxito financiero del
trucción pueden asce
yen los costos de to
junto con las tuberías
tos para el proceso.
eficiente y retroalim
para lo que se necesi
En la figura 25-43
el control de costos.
tivo basado en el ca
construcción, el inge
lizados del control d
triz, informes mensu
ro gastado, así como
hasta esa fecha. Los
de acuerdo con el c
proyecto. Los regist
las horas de mano
construcción recibe
teriales que hay en e
ello. Todas las órde
misos o pagos estim
matriz o en la oficin
de los almacenes.
Al final de cada n
información en un i
les se pueden utiliz
obra. Los informes
ción, concreto, alb
etc., se utilizan para
partidas. Los anális
ñalan posibles dific
des con una partida
residentes y de pro
En la práctica, c
personal adquiere c
mo el mantenimien
permitirán un efici
Los informes de
ferencia en forma
misos, costos estim
nes esperadas resp

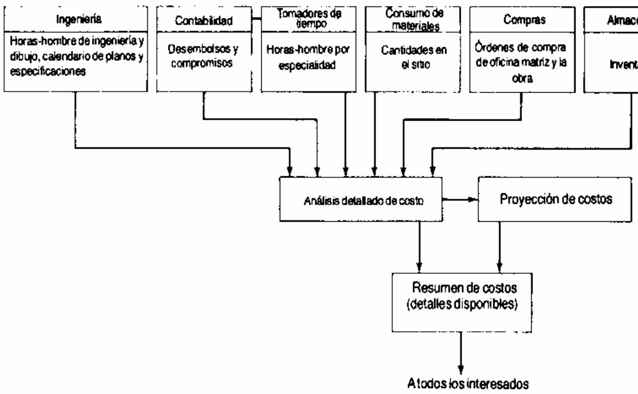


FIG. 25-43 Flujo de información para control de costos.

proyecto. Una vez que el departamento de compras ha colocado los pedidos del equipo y materiales, la rapidez y la eficiencia durante la etapa de la construcción son de máxima importancia para garantizar el éxito financiero del proyecto. Los gastos de campo durante la construcción pueden ascender de 30 a 60% del costo del capital fijo e incluyen los costos de toda la mano de obra, equipo instalado, materiales junto con las tuberías del proceso, instrumentos eléctricos y aislamientos para el proceso. Por ello, la construcción requiere una ejecución eficiente y retroalimentación oportuna de la información del avance, para lo que se necesita un buen sistema de control de costos.

En la figura 25-43 se ilustra el flujo de información requerida para el control de costos. En la gráfica se supone que hay un cálculo definitivo basado en el catálogo estándar de cuentas. Conforme avanza la construcción, el ingeniero de costos del campo recibe informes actualizados del control de costos. El ingeniero recibe, desde la oficina matriz, informes mensuales de las horas de ingeniería y dibujo y del dinero gastado, así como una lista de planos y especificaciones terminadas hasta esa fecha. Los gastos mensuales y los compromisos se presentan de acuerdo con el catálogo de cuentas y los libros auxiliares para el proyecto. Los registros de los tomadores de tiempo dan los detalles de las horas de mano de obra directa e indirecta. El superintendente de construcción recibe informes diarios de las cantidades de equipo y materiales que hay en el sitio, determinados por el personal encargado de ello. Todas las órdenes de compra se registran en libros como compromisos o pagos estimados por vencer, sean las colocadas por la oficina matriz o en la oficina del sitio y se mantiene un inventario actualizado de los almacenes.

Al final de cada mes, el ingeniero de costos de campo acopia toda la información en un informe detallado de costos; ya que son costos reales se pueden utilizar para calcular los futuros costos hasta concluir la obra. Los informes diarios de costos unitarios por avance de excavación, concreto, albañilería, acero, tubería, componentes eléctricos, etc., se utilizan para predecir aumentos o reducciones en las diversas partidas. Los análisis y las comparaciones con el cálculo original señalan posibles dificultades para atención inmediata. Si hay dificultades con una partida, se llama la atención de inmediato a los ingenieros residentes y de proyecto para tomar acción correctiva.

En la práctica, cuando existe un estricto control de costos, todo el personal adquiere conciencia de los costos que, incluso en trabajos como el mantenimiento del equipo de construcción y limpieza en la obra, permitirán un eficiente control general de costos.

Los informes de costos deben ser breves pero informativos, de preferencia en forma de resumen. Deben presentar los gastos y compromisos, costos estimados para la terminación y aumentos o disminuciones esperadas respecto al presupuesto autorizado para cada partida importante. Las desviaciones importantes se indicarán con notas. Cualquier exceso grande y persistente se debe investigar e informar a los gerentes de proyecto y de construcción para su atención inmediata. Si no se puede evitar un exceso esperado, el informe de costos reales debe servir como justificación para solicitar fondos adicionales.

Cuando el sistema de control de costos está organizado en forma eficiente, no requerirá más papeleo que el normal para la construcción. El costo de tal control parece variar entre 0.2 y 0.5% del valor total del proyecto. Suele bastar el manejo adecuado de los documentos normales y disponibles para control de mano de obra, de inventario en almacén y para fines contables. Los ahorros logrados con un buen control de costos serán mayores que los gastos adicionales del sistema. H. C. Bauman (*Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964, pp. 190-196) expone detalles adicionales de esta técnica.

El calendario de construcción es parte esencial del control del proyecto para asegurar la terminación en el menor tiempo posible. En el cálculo de control del proyecto se define con amplitud el calendario para construcción. Con ello es posible preparar el calendario general y establecer la secuencia y sincronización del trabajo de instalación con base en la experiencia. Los planos se suelen terminar en un orden predeterminado, porque dependen de ciertos trabajos preliminares o de diseño. El orden normal para la terminación de los planos y especificaciones es 1) trabajos en el terreno, 2) subestructuras, 3) superestructuras para equipo y edificios, 4) distribución física del equipo, 5) tuberías, 6) aislamientos, 7) instrumentos y 8) trabajo eléctrico.

Después, la planeación y calendarios detallados incluyen establecer las partidas de trabajo y el número requerido de personas para cada una de ellas. Con esta información es posible preparar gráficas de barras de 4 semanas por mes que incluyan la interdependencia de las diversas funciones. La fecha de comienzo de cada clase de trabajo se establece en la gráfica y la duración se calcula con las horas de mano de obra asignadas a ese trabajo en el cálculo de control de costos. El trabajo debe avanzar sin tropiezos, pero las operaciones deben estar relacionadas por orden de precedencia. Las fechas de comienzo de cada partida del trabajo se escalonan de acuerdo con el orden de terminación de los planos y se determinan los requisitos de mano de obra.

Para empezar el boceto de la gráfica de barras se anotan las fechas de llegada de los componentes clave, por orden de precedencia. Se puede estimar la duración del tiempo de erección de equipo para determinar la fecha de colocación de tubería. Ya que las estructuras deben estar terminadas cuando llega el equipo, es posible retroceder en la gráfica de barras hasta la preparación de los cimientos. Con la gráfica ya terminada, se puede establecer una fecha tentativa para la puesta en marcha (arranque), una vez que se da una tolerancia de unas cuantas

TABLA 25-61 Costos relativos de equipos y materiales; Estados Unidos y otros países, 1979

	Estados Unidos	Gran Bretaña	Italia	México	Rep. Federal Alemana	Francia	Canadá	Japón
Equipo								
Tanques, recipientes	1.00	0.95	0.90	0.90	0.95	0.95	1.05	0.85
Bombas	1.00	0.90	0.85	0.95	0.90	0.90	1.00	0.90
Filtros, centrífugas	1.00	0.90	0.90	1.00	0.90	0.90	1.05	0.90
Compresores	1.00	0.85	0.80	0.95	0.90	0.90	1.05	1.00
Intercambiadores de calor	1.00	0.95	0.90	1.00	0.90	1.00	1.05	1.10
Secadores, calderas	1.00	0.95	1.00	1.05	0.90	1.00	1.05	0.95
Colectores de polvo	1.00	1.05	1.00	1.05	0.95	0.95	1.05	0.90
Unidades de refrigeración	1.00	1.00	0.95	1.10	0.95	0.95	1.05	0.90
Materiales								
Tubería	1.00	0.90	0.90	1.05	0.90	0.95	1.05	0.90
Aislamiento	1.00	0.90	0.90	0.95	0.90	0.95	1.05	0.90
Instalación eléctrica	1.00	1.10	0.85	1.05	0.95	0.95	1.10	0.85
Instrumentos	1.00	1.05	1.00	1.20	1.00	1.05	1.05	0.95

TABLA 25-62 Salarios por hora para construcción en diversos países comparados con Estados Unidos, diciembre 1979*

Especialidad	Estados Unidos	Canadá	Gran Bretaña	Rep. Fed. Alemana	Brasil	Francia	Italia	Australia	México	Japón	India
Peones	$11.11	$ 9.64	$3.96	$11.02	$0.48	$3.17	$8.43	$3.23	$0.75	$ 6.07	$0.16
Carpinteros	14.20	12.42	4.60	16.70	0.76	4.82	9.15	4.17	1.52	9.11	0.31
Albañiles	14.41	13.14	4.60	12.15	0.76	4.82	8.97	4.17	1.10	7.84	0.31
Herreros	15.24	13.50	4.60	11.84	0.74	4.82	8.73	4.30	1.74	10.12	0.32
Promedio de estos trabajadores	13.74	12.17	4.44	12.93	0.69	4.41	8.82	3.97	1.28	8.29	0.28
Relación para Estados Unidos	1.00	0.89	0.32	0.94	0.05	0.32	0.64	0.29	0.09	0.60	0.02

*De *Engineering News-Record*, actualización de costos del cuarto trimestre, diciembre 20, 1979.

NOTA: Se incluyen beneficios adicionales (prestaciones).

semanas para los inevitables "detalles". Se pueden acelerar algunas actividades, pero se debe tener en cuenta el costo adicional.

Para indicar el avance real de la construcción en la gráfica de barras se van llenando los espacios abiertos de acuerdo con el porcentaje ya terminado. La comparación del avance real de todo el proyecto contra la curva de horas de mano de obra acumuladas indican si el trabajo está o no dentro del calendario. Si se requiere acción correctiva, se debe concentrar en las partidas clave o críticas.

Los proyectos grandes suelen requerir análisis de red con el método de la ruta crítica (CMP) o técnica para evaluación y revisión del programa (PERT) en las etapas de planeación, fijación de fechas y control del avance. J. W. Hackney (*Control and Management of Capital Projects*, Wiley, New York, 1965, pp. 118-131) presenta ejemplos de gráficas de barras y una amplia descripción del análisis de red. L. A. Swanson y H. L. Pazer (*Pertsim: Text and Simulation*, International Textbook, Scranton, Pa., 1969) describen con amplitud el empleo de las técnicas de PERT y CPM aplicadas a las propuestas para contratos y al control de proyectos e incluyen una técnica de simulación manual basada en métodos probabilísticos.

Costos de construcción en otros países Aunque en la tabla 25-54 se presentan los factores de ubicación para construir plantas de productos químicos con funciones similares en diversos países, a precios de 1977, pueden tener variaciones en un periodo por los cambios locales en los costos y productividad de la mano de obra. Por ello, a menudo es necesario calcular por separado los diversos componentes del costo de construcción en otros países. Los precios del equipo y materiales dependerán de los costos de la mano de obra local y de la disponibilidad de materia prima. Si hay que importar los materiales básicos, el costo en el punto de origen es importante y hay que agregarle los fletes y derechos aduanales.

El **equipo y material** suelen ser entre 40 y 45% de los costos de una típica planta para productos químicos. En la tabla 25-61 se indican los costos relativos de equipo y materiales de uso común en diversos países. En general, su costo es un poco menor en Europa y Japón, mientras que en México y Canadá están más cerca del promedio de Estados Unidos.

La **mano de obra para construcción** es alrededor de 20 a 35% del costo total de la planta. En la tabla 25-62 aparece una comparación del salario promedio por hora en 1979, para diversos tipos de mano de obra para construcción en varios países y en Estados Unidos. La mayor parte de los salarios, excepto en Canadá y la República Federal Alemana son muy inferiores al promedio de Estados Unidos. Los datos se publican cada trimestre en *Engineering News-Record* e incluyen todos los beneficios adicionales aplicables.

Los **beneficios adicionales** llamados también prestaciones o cargos sociales en diversos países de habla castellana, en muchos de los cuales son por ley, varían mucho en relación con los de Estados Unidos y de un país a otro. Los típicos pueden ser ayuda según el número de hijos, Seguridad Social que incluye servicio médico, medicinas y hospitalización, beneficios por maternidad, beneficios por incapacidad, gastos de sepelio, pensiones después de cierta edad, seguro de desempleo y pensiones para jubilación. También pueden ser prima por vacaciones o vacaciones con sueldo completo, gratificaciones a aprendices, ayuda para cambio de residencia, indemnización por despido, participación de utilidades, bonificaciones por productividad, gratificaciones anuales, ciertos beneficios adicionales según la categoría del puesto y, a

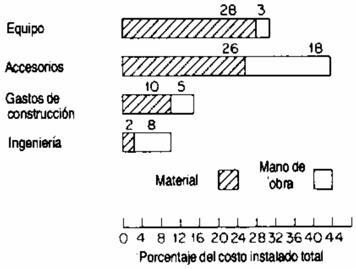


FIG. 25-44 Desglose típico de los costos de una planta de productos químicos en componentes principales.

TABLA 25-63 Costos relativos de construcción de plantas en diversos países comparados con Estados Unidos (valores 1979)

País	Equipo	Material	Mano de obra	Ingeniería	Total
Estados Unidos	0.28	0.38	0.26	0.08	1.00
Gran Bretaña	0.26	0.41	0.18	0.05	0.90
Italia	0.22	0.32	0.31	0.05	0.90
México	0.26	0.35	0.35	0.04	1.00
Australia	0.38	0.54	0.29	0.09	1.30
Canadá	0.32	0.44	0.31	0.08	1.15
Francia	0.27	0.40	0.22	0.06	0.95
Rep. Fed. Alemana	0.26	0.36	0.32	0.06	1.00
Japón	0.29	0.35	0.22	0.04	0.90

veces, pago total o parcial de la renta de la habitación. Hay que investigar a fondo la situación local para determinar los beneficios y el costo adicional que representan por hora o por día.

La productividad de la mano de obra depende mucho de la salud y el bienestar de los trabajadores y también de la disponibilidad de herramientas y equipo para construcción que ahorren trabajo. La frecuencia de huelgas, días festivos, "tortuguismo" e intranquilidad política disminuyen la productividad. La contratación de personal no sindicalizado y los conflictos entre sindicatos influirán en la productividad de la mano de obra. El empleo de equipo, piezas y métodos estándar tiende a mejorar la productividad.

En un país determinado, la productividad dependerá de las horas trabajadas por semana. La producción aumentará si se labora tiempo extra, pero la fatiga natural disminuirá la productividad.

TABLA 25-64 Factores para seleccionar un lugar en el extranjero para instalar una planta*

Factores económicos
- Volumen del PNB y tasa de crecimiento
- ¿Hay un plan de desarrollo en marcha?
- Resistencia a la recesión
- Dependencia relativa de importaciones y exportaciones
- Situación respecto a divisas
- Perspectivas de la balanza de pagos
- Estabilidad de la moneda; convertibilidad
- Reglamentos para remesas y repatriación
- Balance de la economía (industria-agricultura-comercio)
- Tamaño del mercado para sus productos; tasa de crecimiento
- Población; tasa de crecimiento
- Ingreso per cápita; tasa de crecimiento
- Distribución del ingreso
- Asociación actual o posible en una unión aduanera
- Niveles de precios; tasa de inflación

Factores políticos
- Estabilidad y forma de gobierno
- Existencia o ausencia de antagonismo de clases
- Problemas políticos, étnicos y sociales
- Actitud hacia la inversión privada y extranjera
- Aceptación de inversión extranjera por el gobierno
- Aceptación de inversión extranjera por clientes y competidores
- Existencia o ausencia de amenazas de nacionalizaciones
- Existencia o ausencia de industrias estatales
- ¿Recibe la industria estatal tratamiento privilegiado?
- Concentración de la influencia en grupos pequeños
- ¿Hay tratados de amistad con dicho país?

Factores gubernamentales
- ¿Son sanas las políticas fiscal y monetaria?
- Ausencia de trámites burocráticos excesivos
- Rectitud de los procedimientos administrativos
- Existencia de discriminación contra lo extranjero
- Rectitud de los tribunales
- Leyes sobre inversión claras y modernas
- Se pueden patentar sus productos
- Presencia o ausencia de controles de precios
- Restricciones al 100% de inversión extranjera

Factores geográficos
- Eficiencia del transporte (ferrocarriles, vías fluviales, carreteras)
- Instalaciones portuarias
- Puertos libres, zonas libres, recintos fiscalizados
- Proximidad del sitio con los mercados de exportación
- Proximidad del sitio con proveedores y clientes
- Proximidad con las fuentes de materia prima
- Industria auxiliar existente
- Disponibilidad de materia prima local
- Disponibilidad de electricidad, agua y gas
- Confiabilidad de los servicios públicos
- Instalaciones para eliminación de desechos
- ¿Es fácil hacer las exportaciones?
- ¿Es fácil hacer las importaciones?

Factores geográficos (continúa)
- ¿Ya hay sitios disponibles para plantas?
- Costo de terrenos adecuados

Factores laborales
- Disponibilidad de personal administrativo, técnico y de oficinas, bilingüe
- Disponibilidad de mano de obra especializada
- Disponibilidad de mano de obra semiespecializada y no especializada
- Grado de productividad de los trabajadores
- Instalaciones para adiestramiento (capacitación)
- Perspectiva de aumento en oferta de mano de obra
- Grado de pericia y disciplina en todas las categorías
- Buenas relaciones empresa-trabajadores
- Presencia o ausencia de grupos extremistas
- Grado de intervención de los trabajadores en la administración
- Libertad de contratación y despido
- Prestaciones obligatorias y voluntarias
- Cuotas de seguridad social
- Costo total, incluso prestaciones, comparado con otros lugares
- Reparto de utilidades obligatorio o usual

Factores fiscales
- Tasas de impuestos (a las empresas, al trabajo personal, a la propiedad, retenciones, ventas, tenencia, sobre nóminas, utilidades distribuibles, derechos de importación, indirectos y locales)
- Moralidad en el pago de impuestos
- Rectitud y honradez de las autoridades fiscales
- Tendencias a largo plazo de los impuestos
- Impuestos a la exportación y repatriación de capitales
- Estímulos fiscales para nuevas empresas
- Tasas de depreciación
- Aplicación de pérdidas contra impuestos futuros
- Tratados internacionales sobre impuestos
- Devolución de derechos e impuestos al exportar bienes importados
- Disponibilidad de protección arancelaria

Factores de fuentes de capital
- Disponibilidad de capital local
- Costo del dinero en bancos locales
- Condiciones normales para préstamos locales
- Disponibilidad local de monedas convertibles
- Sistema bancario moderno
- Créditos gubernamentales para nuevas industrias
- Disponibilidad y costo de financiamiento y seguros para exportación
- ¿Hay facilidad de obtener capital en Estados Unidos u otros países?

Factores comerciales
- Disponibilidad del seguro sobre inversiones del gobierno del propio país
- Moralidad mercantil general
- Estado del sistema de comercialización y distribución
- ¿Son sencillos y eficaces los procedimientos administrativos?
- Margen de utilidad normal en general en su industria
- Situación competitiva en su industria: ¿está monopolizada?
- ¿Hay legislación antimonopolios y restrictiva muy distinta a la del país propio?
- Disponibilidad de habitaciones y vida social para personal ejecutivo y sus familias

*Reproducida con permiso de *Business International*, mayo 18, 1962.

En Estados Unidos la mano de obra especializada para la construcción suele trabajar semana de 35 horas. En Gran Bretaña laboran 40 horas semanalmente, aunque se trata de reducirlas a 35. En los países europeos la jornada semanal es de 42 horas y en otros países, como en Japón, es de 45 horas semanarias.

La productividad de la mano de obra local también depende del empleo y disponibilidad de herramientas mecánicas y equipo para construcción modernos. Por lo general, el bajo costo de la mano de obra en ciertos países hace que se reduzca la compra o arrendamiento de equipo complejo para ahorrar trabajo y estimula el empleo de gran número de trabajadores, en particular en países en desarrollo como India, Pakistán, sureste de Asia y muchos países africanos. Esto, a su vez, aumenta los costos de construcción. El empleo de equipo para ahorrar trabajo es normal en Canadá, Europa Occidental, Japón y, en grado creciente, en el Medio Oriente.

Costos de la planta completa Es difícil comparar los costos de plantas en distintos países por la gran variedad de tipos y tamaños de ellas y los rápidos cambios en la tecnología. Hay pocos datos útiles y las siguientes comparaciones se deben emplear con cuidado y sólo para cálculos de orden de magnitud del costo del capital fijo.

En este método se utiliza un desglose de costos de una planta típica de productos químicos instalada en Estados Unidos (Fig. 25-44). Los costos de equipo, accesorios, construcción e ingeniería y con costos de material y mano de obra separados, se presentan como porcentaje del costo total instalado en Estados Unidos. Los cuatro componentes del costo son:

Equipo Incluye todas las máquinas, artefactos o sistemas prefabricados como tanques, intercambiadores de calor, bombas, motores, tableros de control y calderas.

Accesorios: Incluye material como tubería, válvulas, accesorios para tubo, *conduit*, alambres y cables, tubo especial y aislamiento.

Gastos de construcción Incluye el costo del equipo de construcción, herramientas, cobertizos, vías férreas, materiales para caminos, máquinas soldadoras, andamios y madera que se emplean para la construcción pero no son parte permanente de la planta.

Ingeniería Casi todo es mano de obra y un pequeño componente de costo de equipo y materiales como instrumentos, papel y material para dibujo y costos de ls copias.

En total, la mano de obra asciende al 34% y el material al 66% del costo total instalado.

En la tabla 25-63 se utilizan los datos de la figura 25-44 para comparar los costos relativos de capital fijo para construir una planta en Estados Unidos y en otros países. Las relaciones de costo se establecieron con datos similares a los de las tablas 25-61 y 25-62. Los valores para mano de obra se corrigieron para los diferentes salarios y horas de trabajo por semana locales, duración de la obra y el grado de mecanización disponible en otros países. Es difícil calcular algunos de estos factores y las relaciones finales "totales" dan un valor razonable de orden de magnitud de los costos relativos de construcción de plantas equivalentes en los países citados.

La elección de un sitio para una planta en otro país requiere tener en cuenta muchos factores políticos y económicos además de los costos. En la tabla 25-64 se presenta una lista de 92 factores a considerar cuando se quiere hacer esa elección.

Anthony J. Buo
Cashman Associ
Pollution Control
aire)

Louis Theodore
Member, Air Poll

Ross E. McKin
University of Ka
de desperdicio)

George Tchoba
California at Da
Control Federati

INTRODUCCI

Enfoque de medios
relacionados con el
Unidos . . . . . .
Estrategias de la pl
Planeación estratég

MANEJO DE L
P(

Introducción . . .
Contaminantes
Contaminantes
Estimación de la
Efectos de los c
Leyes, reglamento
Estados Unidos .
Clean Air Act d
Prevención de d
Programa de inc

ıtos o sistemas prefa-
ıor, bombas, motores,

válvulas, accesorios
cial y aislamiento.
l equipo de construc-
eriales para caminos,
emplean para la cons-
ıta.
pequeño componente
ıtos, papel y material

l material al 66% del

gura 25-44 para com-
nstruir una planta en
s de costo se estable-
l y 25-62. Los valores
tes salarios y horas de
y el grado de mecani-
ular algunos de estos
n valor razonable de
nstrucción de plantas

país requiere tener en
además de los costos.
res a considerar cuan-

Sección 26

Manejo de los desperdicios

Anthony J. Buonicore, M.CH.E., P.E., *Diplomate, AAEE, President, Buonicore-Cashman Associates, Inc.; Member, American Institute of Chemical Engineers, Air Pollution Control Association. (Editor de la sección, Manejo de la contaminación del aire)*

Louis Theodore, Sc.D., *Professor of Chemical Engineering, Manhattan College; Member, Air Pollution Control Association. (Coeditor de la sección)*

Ross E. McKinney, Sc.D., *N.T. Veatch Professor of Environmental Engineering, University of Kansas; Member, American Academy of Engineering. (Manejo del agua de desperdicio)*

George Tchobanoglous, *Professor of Environmental Engineering, University of California at Davis; Member, American Society of Civil Engineers, Water Pollution Control Federation. (Manejo de los desperdicios sólidos industriales)*

INTRODUCCIÓN AL MANEJO DE LOS DESPERDICIOS

Enfoque de medios múltiples para los reglamentos relacionados con el medio ambiente en Estados Unidos . . . 26-3
Estrategias de la planta . . . 26-3
Planeación estratégica corporativa . . . 26-3

MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE PRODUCIDA POR FUENTES ESTACIONARIAS

Introducción . . . 26-4
  Contaminantes gaseosos . . . 26-5
  Contaminantes en partícula . . . 26-6
  Estimación de las emisiones de las fuentes . . . 26-6
  Efectos de los contaminantes del aire . . . 26-6
Leyes, reglamentos y oficinas gubernamentales de Estados Unidos . . . 26-11
  Clean Air Act de 1970 . . . 26-11
  Prevención de deterioro significativo (PSD) . . . 26-18
  Programa de industrialización controlada . . . 26-20
Método para una estrategia sobre el problema del control de la fuente . . . 26-20
  Estrategia . . . 26-20
  Factores que afectan la selección del equipo de control . . . 26-21
  Comparación de opciones para el equipo de control . . . 26-22
Dispersión de las chimeneas . . . 26-22
  Consideraciones preliminares de diseño . . . 26-22
  Cálculos de diseño . . . 26-25
  Efectos diversos . . . 26-26
Control de la fuente de emisiones gaseosas . . . 26-26
  Absorción . . . 26-26
  Adsorción . . . 26-27
  Combustión . . . 26-29
  Condensación . . . 26-32
Control de la fuente de emisiones de partículas . . . 26-33
Medición de las emisiones . . . 26-34
  Introducción . . . 26-34
  Metodología de muestreo . . . 26-35
  Opacidad . . . 26-39

MANEJO DEL AGUA DE DESPERDICIO INDUSTRIAL

Introducción 26-40
Leyes, reglamentos y oficinas gubernamentales de Estados Unidos 26-41
Legislación federal 26-41
Environmental Protection Agency 26-41
Oficinas estatales para el control de la contaminación del agua 26-41
Características del agua de desperdicio 26-41
Compuestos orgánicos 26-41
Compuestos inorgánicos 26-41
pH y alcalinidad 26-41
Temperatura 26-42
Oxígeno disuelto 26-42
Pretratamiento 26-42
Igualación 26-42
Neutralización 26-42
Eliminación de grasa y aceite 26-42
Sustancias tóxicas 26-42
Tratamiento primario 26-43
Tamices 26-43
Cámaras de arena 26-43
Sedimentación por gravedad 26-43
Precipitación química 26-44
Tratamiento secundario 26-44
Conceptos del tratamiento biológico 26-44
Lagunas 26-45
Filtros de goteo 26-46
Contactores biológicos giratorios (RBC) 26-46
Sedimento activado 26-47
Tratamiento físico y químico (PCT) 26-49
Conceptos del PCT 26-49
Limitaciones del PCT 26-49
Procesamiento del sedimento 26-49
Objetivos 26-49
Espesamiento 26-49
Flotación 26-49
Centrifugación 26-50
Digestión anaerobia 26-50
Filtro anaerobio 26-50
Digestión aerobia 26-50
Acondicionamiento químico 26-50
Acondicionamiento térmico 26-50
Filtración al vacío 26-51
Filtración a presión 26-51
Filtros prensa de banda 26-51
Lechos de arena 26-51
Colocación final del sedimento 26-51
Incineración 26-51
Rellenos sanitarios del terreno 26-51
Disceminación en el terreno 26-51
Recirculación y reutilización 26-52
Conservación del agua 26-52
Segregación del agua 26-52
Descarga cero 26-52

MANEJO DE LOS DESPERDICIOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

Introducción 26-52
Elementos funcionales 26-52
Sistemas de manejo de los desperdicios sólidos 26-53
Leyes, reglamentos y oficinas gubernamentales de Estados Unidos 26-53
Legislación 26-53
Oficinas gubernamentales 26-53
Generación de los desperdicios sólidos 26-54
Tipos de desperdicios sólidos 26-54
Fuentes de desperdicios industriales 26-54
Propiedades de los desperdicios sólidos 26-56
Cantidades de desperdicios sólidos 26-58
Manejo, almacenamiento y procesamiento en el sitio 26-59
Manejo en el sitio 26-59
Almacenamiento en el sitio 26-60
Procesamiento de los desperdicios sólidos en el sitio 26-60
Recolección de los desperdicios sólidos 26-60
Servicios de recolección 26-61
Tipos de sistemas de recolección 26-61
Determinación de los requerimientos de vehículos y mano de obra 26-63
Rutas de recolección 26-65
Transferencia y transporte 26-65
Estaciones de transferencia 26-65
Medios y métodos de transferencia 26-66
Localización de las estaciones de transferencia 26-67
Transferencia y transporte de desperdicios peligrosos 26-67
Procesamiento y recuperación de recursos 26-67
Técnicas de procesamiento 26-67
Procesamiento de desperdicios peligrosos 26-68
Sistemas de recuperación de materiales 26-70
Recuperación de los productos de conversión biológica 26-71
Recuperación de los productos de conversión química 26-72
Recuperación de energía de los productos de conversión 26-72
Colocación final 26-73
Relleno del terreno con desperdicios sólidos 26-74
Relleno del terreno con desperdicios peligrosos 26-79
Cultivo del terreno 26-80
Inyección de pozo profundo 26-81
Colocación de los desperdicios sólidos en el océano 26-83
Planeación 26-83

. . . . 26-52
. . . . 26-52
. . . . 26-52
; INDUSTRIALES
. . . . 26-52
. . . . 26-52
. . . . 26-53
. . . . 26-53
. . . . 26-53
. . . . 26-53
. . . . 26-54
. . . . 26-54
. . . . 26-54
. . . . 26-56
. . . . 26-58
) 26-59
. . . . 26-59
. . . . 26-60
. . . . 26-60
. . . . 26-60
. . . . 26-61
. . . . 26-61
;
. . . . 26-63
. . . . 26-65
. . . . 26-65
. . . . 26-65
. . . . 26-66
. . . . 26-67
. . . . 26-67
. . . . 26-67
. . . . 26-67
. . . . 26-68
. . . . 26-70
. . . . 26-71
. . . . 26-72
. . . . 26-72
. . . . 26-73
. . . . 26-74
. . . . 26-79
. . . . 26-80
. . . . 26-81
no 26-83
. . . . 26-83

INTRODUCCIÓN AL MANEJO DE LOS DESPERDICIOS

En esta sección se presentan varias referencias relacionadas con las leyes y procedimientos formulados en Estados Unidos respecto al manejo de los desperdicios. El ingeniero que se enfrenta a problemas de manejo de los desperdicios en otros países debe conocer las leyes y reglamentos específicos de ese país. Aun así, se considera que el tratamiento aquí presentado es una guía general útil.

Enfoque de medios múltiples para los reglamentos relacionados con el medio ambiente en Estados Unidos Entre los problemas más complejos que enfrentó la industria en la década de los ochenta se encuentra el control y uso adecuado del medio ambiente natural. En la década de los setenta, los ingenieros tomaron conciencia de su responsabilidad ante la sociedad, especialmente en los aspectos relacionados con la salud y el bienestar público. En esta década se creó y creció rápidamente la Environmental Protection Agency de EE UU (EPA) y se promulgaron leyes federales y estatales que en forma virtual regulan cada aspecto del medio ambiente. Sin embargo, a fines de dicha década se observó que sólo se habían enfrentado los problemas más sencillos. Un número limitado de grandes fuentes de contaminación habían eliminado de sus emisiones porcentajes sustanciales de unos cuantos contaminantes del aire, fácilmente definibles. El incremento en los costos para aumentar los porcentajes de eliminación era considerable e involucraba un número cada vez mayor de fuentes pequeñas y, en consecuencia, los riesgos para la salud de otros contaminantes tóxicos que aún quedaban por cuantificarse y era necesario desarrollar técnicas de control.

A principios de la década de los setenta, el aire, el agua y la tierra se trataron como áreas problemáticas separadas, que se regulaban por sus propios estatutos y reglamentos. Sin embargo, a fines de dicha década era obvio que los problemas del medio ambiente estaban íntimamente relacionados y deberían tratarse en conjunto. El tipo tradicional del proceso estándar de reglamentación —orden y control— restringió severamente las opciones de acatamiento.

La década de los ochenta se inició con los esfuerzos de EPA para redirigir y obtener provecho del conocimiento de casos específicos, experiencia técnica e imaginación de los que estaban en proceso de reglamentación. Al proporcionar incentivos a los ingenieros de las plantas, con objeto de encontrar métodos más eficientes para abatir la contaminación, se estimuló considerablemente la innovación de la tecnología de control. Este fue el principal objetivo, por ejemplo, del programa de "industrialización controlada" para prevenir la contaminación del aire propuesto por EPA en 1976, cuyo fundamento estatutario está dado por la clean Air Act Amendments (Reformas a la Ley de Aire Limpio) de 1977.

La rápida expansión del conjunto de reglamentos federales representa un reto importante a las prácticas tradicionales de toma de decisiones corporativas, de administración y de planeación a largo plazo. Los responsables de la construcción de plantas nuevas deben considerar el conjunto de requerimientos nuevos y elaborar un enfoque diferente.

Aún no se aprecia en su totalidad el impacto completo de Clean Air Act Amendments de 1977, Clean Water Act, Safe Drinking Water Act, Resource Conservation and Recovery Act y Toxic Substances Control Act. La combinación de todos estos requerimientos, que en ocasiones impone exigencias conflictivas o establece planes que no están de acuerdo con el tiempo, hace sumamente compleja la tarea de obtener todos los permisos reglamentarios.

Uno de los impactos principales de los reglamentos para el medio ambiente es que el tiempo muerto requerido para la planeación y construcción de plantas nuevas se incrementa considerablemente. Cuando las plantas nuevas pueden crear complicaciones importantes en relación con el medio ambiente, las implicaciones pueden ser profundas. Por supuesto que la extensión exacta del tiempo muerto adicional para la planeación y construcción varía considerablemente de uno a otro caso, dependiendo de cuáles son los requerimientos que se aplican para la obtención del permiso y las dificultades que se presentan. Sin embargo, para las expansiones importantes en cualquier área de la industria pesada, el retraso resultante de los requerimientos federales puede agregar 2 a 3 años al tiempo muerto total de planeación y construcción. Más aún, siempre existe la posibilidad de que se niegue el permiso reglamentario y, en consecuencia, es necesario desarrollar planes de emergencia para cumplir con la producción.

Toda empresa que planea una expansión importante debe concentrarse desde el principio en los factores relacionados con el medio ambiente. Ya que muchos permisos requieren una audiencia pública, los puntos de vista de los funcionarios locales electos son muy importantes. En la actualidad, la política de aceptación de un proyecto puede ser crítica hasta un grado sin precedentes.

Estrategia de la planta A nivel de la planta se pueden hacer varias cosas para reducir al mínimo el impacto de los requerimientos de calidad del medio ambiente, que incluyen:

1. Mantenimiento de un inventario preciso de las emisiones de la fuente.
2. Evaluación continua de las operaciones del proceso, para identificar las modificaciones potenciales que puedan reducir o eliminar los efectos sobre el medio ambiente.
3. Asegurarse de que existen y se cumplen los programas de mantenimiento preventivo y buena administración.
4. Investigación de las tecnologías nuevas y existentes, relacionadas con el control de la contaminación.
5. Mantenerse bien informado acerca de los reglamentos y las direcciones o tendencias de los mismos.
6. Trabajar en estrecha colaboración con las oficinas de reglamentos y mantener comunicación abierta para analizar los efectos que puedan tener los nuevos reglamentos.

No es realista esperar que en un futuro previsible el Congreso de Estados Unidos invierta la tendencia, reduzca el efecto de los controles reglamentarios o restablezca la situación legal que existía anteriormente, en la cual las empresas privadas podían construir instalaciones importantes con libertad y con pocas o ninguna restricción de los reglamentos federales.

Planeación estratégica corporativa Los planes de emergencia son un componente esencial para la planeación de un medio ambiente sano en una planta nueva. Las incertidumbres relacionadas con el medio ambiente que rodea a un proyecto de gran envergadura deben especificarse y relacionarse con otras contingencias (como, p. ej., la comercialización, reacciones de la competencia, políticas y comercio exterior, etc.) y delinearse en la estrategia global de la corporación.

Los factores relacionados con el medio ambiente deben incorporarse también en el programa técnico o de investigación y desarrollo de la empresa. Ya que en la actualidad la extensión de los planes para un nuevo proyecto puede ampliarse a un periodo de 5 a 10 años, se pueden preparar programas de investigación y desarrollo para proyectos específicos, que incluyan nuevos controles para los procesos o tecnologías de desarrollo reciente.

Otra necesidad evidente es la integración de los factores del medio ambiente en la planeación financiera de los proyectos importantes. Debe reconocerse que la planeación estratégica del medio ambiente es tan importante para la corporación (como meta a largo plazo) como la planeación financiera. Quizá sea necesario tomar decisiones compensatorias, por lo que respecta a las finanzas, a medida que el proyecto pasa por las etapas sucesivas de planeación del medio ambiente y en lo que permitan las negociaciones. Por ejemplo, los requerimientos para el empleo de una tecnología más costosa para el control de la contaminación puede incrementar significativamente el costo total del proyecto, o un cambio de la tecnología de desarrollo reciente a la del proceso interno puede impedir la utilización del financiamiento, mediante bo-

nos de beneficio industrial, de acuerdo con las reglas del Internal Revenue Service (IRS). Los retrasos reglamentarios pueden afectar las suposiciones establecidas sobre la proporción de gastos y los factores de la inflación. Los aspectos de inversión, producción, medio ambiente y legales están interrelacionados y pueden influir mucho en el flujo de caja de la empresa.

La mayor parte de las compañías deben aprender a tratar en forma más creativa a las autoridades locales y a la opinión pública. La responsabilidad social de las empresas puede convertirse en un punto muy importante. Las compañías deben prestar atención y habilidad a la conducción de las audiencias públicas. La administración debe reconocer que las autoridades locales pueden tener otros puntos de vista que van más allá de la captación de nuevos empleos.

Con base en todos estos factores, es evidente que la aprobación y construcción de plantas industriales nuevas importantes, o la expansión de las existentes, es una operación bastante más complicada que lo que era en el pasado, incluso en años recientes. Las estrictas restricciones relacionadas con el medio ambiente pueden impedir la construcción de ciertas instalaciones en lugares donde antes podían construirse. En otros casos, la adquisición de los permisos requeridos puede generar un debate técnico y político, que prolongaría el proceso reglamentario durante varios años.

En muchas ocasiones se imponen requerimientos nuevos, mientras que la empresa obtiene el permiso para la planta propuesta. Por lo tanto, las compañías que planean expander sus instalaciones básicas de producción deben prever sus necesidades con mucha anticipación, iniciar los preparativos para cumplir con los reglamentos que al fin confrontarán y seleccionar los lugares con consideración especial a las características del medio ambiente. El objetivo de esta sección es ayudar al ingeniero a cumplir estos reglamentos contra la contaminación ambiental.

MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE PRODUCIDA POR FUENTES ESTACIONARIAS

Bibliografía General: Billings y Wilder, *Fabric Filter Handbook*, U.S. EPA, NTIS Publ. PB 200-648 (vol. I), PB 200-649 (vol. II), PB 200-651 (vol. III) y PB 200-650 (vol. IV), 1970. Buonicore, "Air Pollution Control", *Chem. Eng.*, **87**(13), 81 (junio 30, 1980). Bounicore y Theodore, *Industrial Control Equipment for Gaseous Pollutants*, vols. I y II, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1975. Calvert, *Scrubber Handbook*, U.S. EPA, NTIS Publ. PB 213-016 (vol. I) y PB 213-017 (vol. II), 1972. Danielson, *Air Pollution Engineering Manual*, EPA Publ. AP-40, 1973. Davis, *Air Filtration*, Academic, New York, 1973. Kleet y Galeski, *Flare Systems Study*, EPA 600/2-76-079 (NTIS), 1976. Lund, *Industrial Pollution Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1971. Oglesby y Nichols, *Manual of Electrostatic Precipitator Technology*, U.S. EPA, NTIS Publ. PB 196-380 (vol. I), PB 196-381 (vol. II), PB 196-370 (vol. III) y PB 198-150 (vol. IV), 1970. *Package Sorption System Study*, EPA-R2-73-202 (NTIS), 1973. Rolke et al., *Afterburner Systems Study*, U.S. EPA, NTIS Publ. PB 212-500, 1972. Slade, *Meteorology and Atomic Energy*, AEC (TID-24190), Oak Ridge, Tenn., 1969. Stern, *Air Pollution*, Academic, New York, 1974. Strauss, *Industrial Gas Cleaning*, Pergamon, New York, 1966. Theodore y Bounicore, *Industrial Air Pollution Control Equipment for Particulants*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1976. Theodore y Bounicore, *Air Pollution Control Equipment-Selection, Design, Operation and Maintenance*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982. Treybal, *Mass Transfer Operations*, 3d ed., McGraw-Hill, New York, 1980. Turner, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, U.S. EPA Publ. AP-26, 1970. White, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1963.

INTRODUCCIÓN

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos grandes categorías: 1) los naturales y 2) los creados por el hombre. Las fuentes naturales de contaminantes del aire incluyen:

- Polvo arrastrado por el viento
- Cenizas y gases volcánicos
- Ozono producido por las descargas eléctricas y presente en la capa de ozono
- Ésteres y terpenos de la vegetación
- Humo, gases y ceniza flotante de los incendios forestales
- Pólenes y otros aeroalergenos
- Gases y olores producto de la descomposición natural
- Radiactividad natural

Estas fuentes constituyen la contaminación de fondo y son la parte del problema de contaminación sobre la cual las actividades de control tienen poco o ningún efecto.

Las fuentes de contaminación creadas por el hombre cubren un amplio espectro de actividades físicas y químicas y son los principales factores de la contaminación del aire urbano. Los contaminantes del aire en Estados Unidos provienen de más de 100 millones de vehículos, los desechos de más de 200 millones de personas, la generación de miles de millones de kilowatts de electricidad y la fabricación de un sinnúmero de productos requeridos en la vida diaria. Sólo en Estados Unidos se generan anualmente casi 300 millones de toneladas de contaminantes del aire. Los cinco tipos principales de contaminantes son las partículas, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre. En la tabla 26-1 aparece un resumen de las emisiones producidas por fuentes estacionarias de combustión en Estados Unidos en 1976.

Los contaminantes del aire también se pueden clasificar según su origen y el estado de la materia:

1. Origen

a) Primario —emitido directamente del proceso a la atmósfera.

b) Secundario —formados en la atmósfera, como resultado de una reacción química.

TABLA 26-1 Emisiones procedentes de los sistemas estacionarios de combustión en Estados Unidos*

	Aire							
						Compuestos orgánicos†		
	Partículas, %	Óxidos de azufre, SO^x	Óxidos de nitrógeno, NO^x	Hidrocarburos, HC, %	Monóxido de carbono, CO, %	BSO, %	PPOM, %	BaP, %
Generación de electricidad	63.8	72.5	64.8	34.0	33.6	8.8	0.3	0.2
Industrial	28.3	14.5	24.7	22.3	14.9	20.0	0.5	1.3
Comercial e institucional	4.9	6.7	7.3	12.2	7.7	16.0	0.2	0.4
Residencial	3.0	6.3	3.2	31.5	44.7	55.2	99.0	98.1
Total, 10 000 ton/año	7060	22 100	10 950	353	1070	125	4.14	0.40

*Fuente: GCA Corp., 1976

2. Estado de la m
a) Gaseoso —g
azufre, óxidos de nit
pores de gasolina, di
pieza, etc.
b) Partículas—
mo, por ejemplo, pol
vapores, nieblas y a
Contaminantes
clasificar como org
1. Gases de azuf
2. Óxidos de ca
3. Gases de nitr
geno y otros óxidos
4. Halógenos y
geno, cloro, flúor, t
5. Productos fo
6. Cianuros: ci

TABLA 26-2 C

Contaminantes
Dióxido de azufre
Monóxido de carbon
Aldehídos
Amoniaco
Arsina
Cloro
Cianuro de hidróge
Fluoruro de hidróge
Sulfuro de hidróge
Óxidos de nitróge
Fosgenos
Partículas en suspe hierro, ceniza, h
Olores

más complicada que
Las estrictas restric-
den impedir la cons-
londe antes podían
s permisos requeri-
, que prolongaría el

tos nuevos, mientras
opuesta. Por lo tanto,
es básicas de produc-
ticipación, iniciar los
al fin confrontarán y
las características del
ara l ingeniero a cum-
biental.

:IONARIAS

:cas y presente en la

lios forestales

ión natural

ado y son la parte del
tividades de control

mbre cubren un am-
son los principales
s contaminantes del
millones de vehícu-
nas, la generación de
la fabricación de un
ria. Sólo en Estados
de toneladas de con-
e contaminantes son
carburos, los óxidos
6-1 aparece un resu-
:ionarias de combus-

clasificar según su

eso a la atmósfera.
mo resultado de una

2. Estado de la materia

a) Gaseoso —gases verdaderos como, por ejemplo, bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono, etc.; o vapores de gasolina, disolventes de pinturas, de productos secos de limpieza, etc.

b) Partículas —sólidos o líquidos finamente divididos; sólidos como, por ejemplo, polvo, emanaciones, humo; y líquidos como gotitas, vapores, nieblas y aerosoles.

Contaminantes gaseosos Los contaminantes gaseosos se pueden clasificar como orgánicos o inorgánicos. Estos últimos incluyen:

1. Gases de azufre: bióxido y trióxido de azufre, ácido sulfhídrico
2. Óxidos de carbono: monóxido y bióxido de carbono
3. Gases de nitrógeno: óxidos nitroso y nítrico, bióxido de nitrógeno y otros óxidos nitrosos
4. Halógenos y haluros: Cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, cloro, flúor, tetrafluoruro de silicio
5. Productos fotoquímicos: ozono, oxidantes
6. Cianuros: cianuro de hidrógeno
7. Compuestos de amonio: amoniaco

Los contaminantes orgánicos incluyen:

1. Hidrocarburos

a) Parafinas: metano, etano, octano

b) Acetileno

c) Olefinas: etileno, butadieno

d) Aromáticos: benceno, tolueno, benzopireno

2. Compuestos alifáticos oxigenados

a) Aldehídos: formaldehído

b) Cetonas: acetona

c) Acidos orgánicos

d) Alcoholes

e) Haluros orgánicos: cloruro de cianógeno, cianuro de bromobencilo

f) Sulfuros orgánicos: sulfuro de dimetilo

g) Hidroperóxidos orgánicos: nitrato o nitrilo de peroxiacilo (PAN)

TABLA 26-2 Contaminantes gaseosos característicos, sus principales fuentes e importancia

Contaminantes del aire	Procedentes de fuentes de fabricación como, por ejemplo	En industrias características	Causan estos efectos dañinos
Dióxido de azufre	Combustión de combustibles (carbón, petróleo), fundición y vaciado, fabricación de papel por el proceso del sulfito	Metales primarios (ferrosos y no ferrosos); pulpa y papel	Irritación de los sentidos y vías respiratorias, daño a la vegetación, corrosión, posible efecto adverso sobre la salud
Monóxido de carbono	Humos de óxidos metálicos, montacargas operados con gas	Metales primarios; acero y aluminio	Reducción en la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre
Aldehídos	Resultado de la descomposición térmica de las grasas, aceites o glicerol	Procesamiento de alimentos, procesos ligeros	Un olor irritante, sofocante, picante, que ahoga; no es peligroso de inmediato para la vida; puede volverse intolerable en muy poco tiempo
Amoniaco	Empleado en refrigeración y procesos químicos como, por ejemplo, pigmentos, explosivos, lacas y fertilizantes	Textiles, productos químicos	Corrosivo al cobre, latón, aluminio y zinc; a altas concentraciones produce quemaduras químicas en la piel húmeda
Arsina	Cualquier proceso de soldadura, baño químico, grabado al aguafuerte o revestimiento metálico, que incluyen el empleo de metales o ácidos que contienen arsénico.	Procesos químicos, fundición	Reducción de los glóbulos rojos de la sangre
Cloro	Procesos de fabricación por electrólisis, blanqueado de algodón y harina, productos químicos orgánicos como subproductos	Textiles, productos químicos	Ataca todo el aparato respiratorio y la membrana mucosa del ojo
Cianuro de hidrógeno	De revestimientos metálicos, altos hornos, tinturas	Fabricación de metales, metales primarios, textiles	Puede afectar las células nerviosas
Fluoruro de hidrógeno	Catalizador en la refinación del petróleo, grabado del vidrio al aguafuerte, extracción de silicatos, como subproducto en la producción electrolítica de aluminio	Petróleo, metales primarios, aluminio	Acción muy corrosiva e irritante en todos los tejidos del cuerpo; daña las plantas de cítricos, afecta los huesos y dientes del ganado a partir de las plantas.
Sulfuro de hidrógeno	Gases de refinería, petróleo crudo, recuperación de azufre, varias industrias químicas que utilizan compuestos de azufre.	Petróleo, productos químicos	Olor desagradable a huevos podridos, irritación en los ojos y las vías respiratorias, oscurecimiento de la pintura exterior.
Óxidos de nitrógeno	Combustión a alta temperatura; limpieza de metales, fertilizantes, explosivos, ácido nítrico; combustión con arco de carbón; fabricación de H_2SO_4.	Fabricación de metales, productos químicos pesados	Gas irritante que afecta los pulmones y daña la vegetación
Fosgenos	Descomposición térmica de hidrocarburos clorados, desengrasado, fabricación de tinturas, productos farmacéuticos, productos químicos orgánicos.	Fabricación de metales, productos químicos ligeros, textiles	Daño capaz de producir edema pulmonar, a menudo retardado
Partículas en suspensión (óxido de hierro, ceniza, hollín, humo)	Procesos de combustión e industriales (procesos a base de oxígeno)	Metales primarios, plantas generadoras de electricidad	Produce suciedad y reduce la visibilidad
Olores	Sacrificio de animales, curtiduría, enlatado, carnes ahumadas, tostado de café, fabricación de cerveza, productos de tocador	Procesamiento de alimentos, industrias relacionadas	Olores objetables

En la tabla 26-2 aparecen los contaminantes gaseosos más comunes, sus fuentes principales y su importancia.

Contaminantes en partículas Las partículas se pueden definir como materia sólida o líquida cuyo diámetro efectivo es mayor que el de una molécula, pero menor a aproximadamente 1000 μm. Las partículas que se dispersan en un medio gaseoso se conocen en conjunto como "aerosoles". Los términos "humo", "niebla", "bruma" y "polvo" se utilizan, por lo general, para describir los tipos particulares de los aerosoles, dependiendo del tamaño, forma y comportamiento característico de las partículas dispersas. Los aerosoles son bastante difíciles de clasificar sobre una base científica, en términos de sus propiedades fundamentales como, por ejemplo, la velocidad de asentamiento bajo la influencia de fuerzas externas, su actividad óptica, la capacidad para absorber cargas eléctricas, el tamaño y estructura de la partícula, la razón superficie/volumen, la actividad de reacción y su acción fisiológica. En general, el tamaño de la partícula y la velocidad de asentamiento han sido las propiedades más características para muchos propósitos. Por ejemplo, las partículas mayores a 100 μm se pueden excluir de la categoría de dispersiones, porque se asientan muy rápidamente. También, las partículas del orden de 1 μm o menos se asientan con tal lentitud, que para propósitos prácticos se pueden considerar como suspensiones permanentes. A pesar de las posibles ventajas de los esquemas de clasificación científica, el empleo de los términos descriptivos populares, como humo, polvo y niebla, que se basan esencialmente en el modo de formación, parecen ser un método de clasificación satisfactorio y conveniente. Además, este método está bien establecido y comprendido, por lo que sin duda será difícil de cambiar.

El polvo se forma por la pulverización o desintegración mecánica de la materia sólida en partículas de menor tamaño, debido a procesos como molienda, trituración y perforación. El tamaño de las partículas de polvo varía desde un límite inferior de aproximadamente 1 μm hasta 100 o 200 μm o más. Generalmente, las partículas de polvo tienen forma irregular; el tamaño de la partícula se refiere a una dimensión promedio para una partícula determinada. Como ejemplos comunes se tiene la ceniza volátil, los polvos de rocas y la harina. El humo implica cierto grado de densidad óptica y es producto característico de la combustión de materia orgánica como, por ejemplo, madera, carbón y tabaco. Las partículas de humo son muy finas y su tamaño varía desde menos de 0.01 μm hasta 1 μm. Por lo general, tienen forma esférica, si su composición es líquida o alquitranada, e irregular, si su composición es sólida. Debido a su tamaño muy fino de partícula, el humo puede permanecer en suspensión durante largo tiempo y mostrar movimiento browniano activo. Las emanaciones se forman por procesos como sublimación, condensación o combustión y, en general a temperaturas relativamente elevadas. Su tamaño de partícula varía desde menos de 0.1 μm hasta 1 μm. En forma similar al humo, las emanaciones se asientan muy lentamente y muestran un fuerte movimiento browniano. Las nieblas o neblinas se forman usualmente por la condensación del agua u otros vapores sobre núcleos adecuados, lo cual produce la suspensión de pequeñas gotas líquidas, o por la atomización de los líquidos. Por lo general, el tamaño de las partículas de las nieblas o neblinas naturales varía entre 2 a 200 μm. Una clasificación más adecuada para las gotas mayores de 200 μm sería llovizna o lluvia. En la sección 20 (Fig. 20-102) aparecen varias propiedades importantes de los aerosoles, que dependen del tamaño de la partícula.

Cuando una sustancia líquida o sólida pasa a la atmósfera como materia en forma de partícula puede presentarse un cambio en sus propiedades y efectos. A medida que la sustancia se divide en partículas más y más pequeñas, una porción mayor de su área superficial queda expuesta al aire. En estas circunstancias, la sustancia, independientemente de su composición química, tiende a combinarse, en forma física o química, con otras partículas o gases presentes en la atmósfera. A menudo, no se pueden predecir las composiciones resultantes. Las partículas muy pequeñas de los aerosoles (de 0.001 a 0.1 μm) pueden actuar como núcleos de condensación, para facilitar la condensación del vapor de agua y, en consecuencia, promover la formación de nieblas y neblinas cercanas a la superficie terrestre. Las partículas con un tamaño inferior a 2 o 3 μm (que constituyen aproximadamente la mitad en peso de las partículas suspendidas en el aire de las ciudades) pueden penetrar la membrana mucosa y atraer y transportar sustancias químicas peligrosas como, por ejemplo, el bióxido de azufre. Debido al incremento del área superficial de las partículas pequeñas de los aerosoles y como resultado de la adsorción de las moléculas de gases o de otras propiedades semejantes, que pueden facilitar las reacciones químicas, los aerosoles muestran una actividad superficial muy incrementada. Muchas sustancias que en su estado masivo se oxidan lentamente, se oxidarán en forma rápida o, incluso, pueden estallar, al dispersarse en el aire como partículas finas. Por ejemplo, el estallido del polvo es, a menudo, producto de una oxidación o combustión inestable de las partículas de combustible, causada por sus superficies específicas relativamente grandes. Los fenómenos catalíticos y de adsorción también son muy importantes para el análisis y la comprensión de los problemas de contaminación por partículas. La conversión del dióxido de azufre a ácido sulfúrico corrosivo, auxiliada por la acción catalítica de las partículas de óxido de hierro, demuestra la naturaleza catalítica de cierto tipo de partículas existentes en la atmósfera. Por último, los aerosoles pueden absorber energía radiante y conducir rápidamente el calor a los gases circundantes de la atmósfera que, por lo general, son incapaces de absorber energía radiante por sí mismos. En consecuencia, el aire en contacto con los aerosoles se vuelve más caliente.

Estimación de las emisiones de las fuentes El conocimiento de los tipos y velocidades de las emisiones es fundamental para la evaluación de los problemas de contaminación del aire. A menudo, un balance de materia del proceso puede ayudar en esta determinación. La estimación de las velocidades de descarga de los contaminantes producidos en los diversos procesos también se puede obtener mediante los factores de emisión publicados (véase *Compilation of Air Pollution Emission Factors*, 2a. ed., AP-42, U. S. EPA, Research Triangle Park, N. C., abril 1973, con todos sus suplementos posteriores). El factor de emisión es un promedio estadístico de la velocidad a la que se emiten los contaminantes, producto de la combustión o el procesamiento de una cantidad determinada de materia, o bien con base en algún otro parámetro significativo. Los factores de emisión son afectados por las técnicas utilizadas en las operaciones de procesamiento, manejo o combustión, por la calidad del material utilizado y por la eficiencia del control de contaminación del aire. Ya que la combinación de estos factores hacen que la fuente sea específica, los factores de emisión para una fuente pueden no ser satisfactorios para otra. Por consiguiente, se requiere cuidado y buen juicio para la identificación de los factores adecuados de emisión. Si estos factores no se pueden identificar o si se va a diseñar el equipo de control de la contaminación del aire, es necesario realizar un muestreo de la fuente específica. En la tabla 26-3 se resumen las principales fuentes industriales de contaminantes, los contaminantes emitidos a la atmósfera y las técnicas características de control.

Efectos de los contaminantes del aire No hay duda de que durante los fenómenos de contaminación más graves, el aire contaminado afecta en forma significativa la salud. Cientos de fallecimientos se han atribuido al intenso *smog* que se presentó en Londres en 1952, 1956, 1957 y 1962; en Donora, Pennsylvania, en 1948 y en Nueva York en 1953, 1963 y 1966. Mucha gente vio minada su salud y, en general, sufrió afecciones pulmonares. Además, cientos de miles de personas padecieron, durante las circunstancias mencionadas, molestias y malestares serios, que incluían irritación de los ojos y dolores en el pecho. En realidad, estos problemas constituyen una parte mínima de los problemas relacionados con la salud. Existe evidencia considerable de que la contaminación del aire es una amenaza crónica para la salud de los seres humanos. Esta evidencia va desde un rápido incremento del enfisema pulmonar y la identificación de compuestos carcinógenos en el *smog* hasta una evidencia estadística, la cual demuestra que las personas expuestas a una atmósfera contaminada, durante periodos prolongados padecen varias enfermedades y, en general, se reducen sus años de vida.

Efectos sobre los seres humanos Existen testimonios suficientes para asegurar que la contaminación atmosférica afecta adversamente

TABLA 26-3 Téc

Industria
Plantas de reducción de alu
Plantas intermitentes de m
Plantas de cemento
Plantas de preparación de
Plantas de coque
Industria de fertilizantes (químicos)

ıs ciudades) pueden
ar sustancias quími-
zufre. Debido al in-
ueñas de los aeroso-
ículas de gases o de
r las reacciones quí-
perficial muy incre-
ıivo se oxidan lenta-
pueden estallar, al
ejemplo, el estallido
ı o combustión ines-
ır sus superficies es-
catalíticos y de ad-
sis y la comprensión
s. La conversión del
tiliada por la acción
emuestra la natura-
ıtes en la atmósfera.
ía radiante y condu-
tes de la atmósfera
energía radiante por
con los aerosoles se

El conocimiento de
ıental para la evalua-
A menudo, un balan-
eterminación. La es-
los contaminantes
ede obtener median-
pilation of Air Pollu-
ı, Research Triangle
ı posteriores). El fac-
elocidad a la que se
ustión o el procesa-
, o bien con base en
de emisión son afec-
ıs de procesamiento,
el utilizado y por la
Ya que la combina-
pecífica, los factores
torios para otra. Por
ara la identificación
ıctores no se pueden
de la contaminación
uente específica. En
ıdustriales de conta-
era y las técnicas ca-

y duda de que duran-
el aire contaminado
allecimientos se han
ıdres en 1952, 1956,
y en Nueva York en
salud y, en general,
le miles de personas
das, molestias y ma-
dolores en el pecho.
e mínima de los pro-
ıcia considerable de
rónica para la salud
ın rápido incremen-
compuestos carci-
ica, la cual demues-
ontaminada, durante
lades y, en general,

timonios suficientes
ıfecta adversamente

TABLA 26-3 Técnicas de control aplicables a los procesos unitarios en fuentes importantes de emisiones

Industria	Proceso de operación	Contaminantes del aire emitidos	Técnicas de control
Plantas de reducción de aluminio	Materiales que se manejan en transportadores de cangilones y de banda o transportadores neumáticos	Partículas (polvo)	Sistemas de extracción y filtros de bolsas
	Preparación de los electrodos anódico y catódico		Sistemas de extracción y colectores mecánicos
	Cátodo: horneado	Emisión de hidrocarburos del aglutinante	
	Ánodo: molienda y mezclado	Partículas (polvo)	
	Horneado	Partículas (polvo), CO, SO_2, hidrocarburos y fluoruros	Ciclones de alta eficiencia, precipitadores electrostáticos, depuradores, combustión o incineración catalítica, mecheros, filtros de bolsas.
	Carga de crisoles	Partículas (polvo), CO, HF, SO_2, CF_4 e hidrocarburos	Ciclones de alta eficiencia, filtros de bolsas, torres de rocío, depuradores de lecho flotante, precipitadores electrostáticos, quemisorción, precipitadores electrostáticos en húmedo.
	Fundición de metales	Cl_2, HCl, CO y partículas (polvo)	Sistemas de extracción y depuradores
Plantas intermitentes de asfalto	Manejo, almacenamiento y clasificadores de materiales: elevadores, rampas, cribas vibratorias	Partículas (polvo)	Sistemas locales de extracción con un ciclón como prelimpiador y un depurador o filtro de bolsas.
	Secadores rotatorios operados con petróleo o gas	Partículas y humo	Control adecuado de la combustión; precalentamiento del petróleo combustible donde se requiere; sistema local de extracción ciclón y depurador o filtro de bolsas.
	Tránsito de camiones	Polvo	Humedecer las rutas de los camiones
Plantas de cemento	Cantera, quebradoras primaria y secundaria, transportador, almacenamiento	Partículas (polvo)	Humedecimiento, sistemas de venteo o extracción con recolectores mecánicos
	Procesos en seco, manejo de materiales, separador de aire (horno de aire caliente	Partículas (polvo)	Sistema de extracción local, recolectores mecánicos y filtros de bolsas
	Molienda	Partículas (polvo)	Sistema de extracción local con ciclones y filtros de bolsas
	Transporte neumático y almacenamiento	Partículas (polvo)	
	Proceso en húmedo, manejo de materiales, molienda, almacenamiento	Materiales húmedos, ausencia de polvo	
	Operaciones del horno: horno rotatorio	Partículas (polvo), CO, SO_x, NO_x, hidrocarburos, aldehídos, cetonas	Precipitador electrostático y filtros de bolsas, depurador, mechero
	Enfriador de escoria: manejo de materiales	Partículas (polvo)	Sistema de extracción local y recolectores mecánicos
	Molienda y embalaje: separador de aire, molienda, transporte neumático, manejo de materiales, embalaje.	Partículas (polvo)	Sistema local de extracción y recolectores mecánicos
Plantas de preparación de carbón	Manejo de materiales: transportadores, elevadores, rampas	Partículas (polvo)	Sistemas locales de extracción y ciclones
	Reducción de tamaño: trituración, cribado, clasificación	Partículas (polvo)	Sistemas locales de extracción y ciclones
	Eliminación de polvo	Partículas (polvo)	Sistema local de extracción, prelimpiador de ciclón, filtros de bolsas
	Almacenamiento del carbón en pilas	Partículas volátiles (polvo)	Humedecimiento, cubierta de rocío plástico
	Pilas rechazadas	H_2S, partículas, y humo procedentes de las pilas de almacenamiento en combustión	Escarbar para apagar el fuego, bombeo de agua hacia el área del fuego, recubrimiento con material incombustible
	Secado del carbón: rotatorio, por cribado, en suspensión, en lecho fluidificado, cascada	Polvo, humo, partículas, óxidos de azufre, H_2S	Sistemas de extracción con ciclones y depuradores Venturi
Plantas de coque	Carga de subproductos al horno	Humo, partículas (polvo)	Carga de la tubería, técnicas cuidadosas de carga, campana portátil, depuradores o filtros de bolsas
	Empuje	Humo, partículas (polvo), SO_2	Reducción al mínimo del empuje del coque verde, depuradores y filtros de bolsas
	Extinción	Humo, partículas (polvo y nieblas), fenoles, amoniaco	Placas desviadoras y torres de rocío
	Procesamiento de los subproductos	CO, H_2S, metano, amoniaco, H_2, fenoles, cianuro de hidrógeno, N_2, benceno, xileno, etc.	Precipitadores electrostáticos, depuradores, mecheros
	Almacenamiento del material (carbón y coque)	Partículas de polvo	Humedecimiento, rocío plástico, técnicas de prevención de incendios
Industria de fertilizantes (químicos)	Fertilizantes fosfatados: trituración, molienda y calcinación	Partículas (polvo)	Sistemas de extracción, depuradores, ciclones, filtros de bolsas
	Hidrólisis de P_2O_5	PH_3, $P_2O_5PO_4$ niebla	
	Acidulación y curado	HF, SiF_4	Depuradores
	Granulación	Humo, partículas (polvo) (recuperación del producto)	Sistemas de extracción, depuradores o filtros de bolsas
	Tratamiento con amoniaco	NH_3, NH_4Cl, SiF_4, HF	Ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de bolsas, depuradores de alta energía
	Acidulación con ácido nítrico	NO_x, compuestos fluorados gaseosos	Depurador, adición de urea
	Almacenamiento y embarque del superfosfato	Partículas (polvo)	Sistema de extracción, ciclones, o filtros de bolsas
	Reactor de nitrato de amonio	NH_3, NO_2	Depuradores
	Torre de granulación	NH_4, NO_3	Control adecuado de la operación, depuradores

TABLA 26-3 Técnicas de control aplicables a los procesos unitarios en fuentes importantes de emisiones (*Continuación*)

Industria	Proceso de operación	Contaminantes del aire emitidos	Técnicas de control
Fundidoras de hierro	Fundición (cubilote)		
	Carga	Humo y partículas	Techo con sistemas de ventilación, postquemador de CO, dispositivo de enfriamiento de gases y depuradores, precipitador electrostático o filtros de bolsas, equipo para humedecer y extinguir el fuego
	Fusión	Humo y partículas, vapores	
	Vertimiento	Niebla de aceite, CO	
	Descarga por el fondo	Humo y partículas	
Latón y bronce	Fundición		
	Carga	Partículas de humo, niebla de aceite	Latón rojo con bajo contenido de zinc: empleo de controles adecuados para la combustión y cubierta para la escoria; latón con alto contenido de zinc: empleo de controles adecuados para la combustión, sistema local de extracción y filtros de bolsas o depurador
	Fusión	Vapores de óxido de zinc, partículas, humo	
	Vertimiento	Vapores de óxido de zinc y óxido de plomo	
Aluminio	Fundición: carga, fusión, vertimiento	Humo y partículas	Carga del material limpio (sin pintura ni grasa); se requiere una operación adecuada; no se necesita equipo para el control de la contaminación del aire, si no se utilizan fundentes y no se requiere desgasificación; la carga de material sucio requiere sistema de extracción con depuradores y filtros de bolsas
Zinc	Fundición Carga	Humo y partículas	Sistema de extracción con ciclones y filtros de bolsas; carga del material limpio (sin pintura ni grasa)
	Fusión	Vapores de óxido de zinc	Desnatamiento cuidadoso de la escoria
	Vertimiento	Niebla de aceite e hidrocarburos procedentes de las máquinas de fundición	Empleo de lubricantes para fundición con baja producción de humo
	Sacudimiento en el manejo de la arena	Partículas (polvo), humo, vapores de compuestos orgánicos	
	Poleas magnéticas, transportadores y elevadores, enfriadores rotatorios, cribas, triturador-mezclador	Partículas (polvo)	Sistema de extracción, depuradores, filtros de bolsas
	Hornos para la fabricación de coque	Acidos orgánicos, aldehídos, humo, hidrocarburos	Empleo de aglutinantes que permitan operar los hornos a menos de 204°C (400°F) o sistemas de extracción y postquemadores
Operaciones de galvanización	Galvanización por inmersión en caliente: el material se sumerge en el zinc fundido; el fundente en polvo sobre la superficie del zinc fundido	Humos, partículas (líquidas), vapores: NH_4Cl, ZnO, $ZnCl_2$, Zn, NH_3, aceite y carbón	Campanas con buen ajuste y velocidades de arrastre elevadas (en algunos casos, la campana no puede estar muy cerca de la paila o cuba; por consiguiente, la velocidad de arrastre debe ser muy elevada), filtros de bolsas, precipitadores electrostáticos
Molinos de pulpa de papel	Digestores: intermitentes y continuos	Mercaptanos, metanol (olores)	Condensadores y empleo del horno de cal, la caldera para el combustible sucio o los hornos como postquemadores
	Evaporadores de efecto múltiple	H_2S, otros olores	Depuradores cáusticos y oxidación térmica de incondensables
	Horno de recuperación	H_2S, mercaptanos, sulfuros orgánicos y disulfuros	Controles para la combustión del papel para carga variable y flujo no restringido de aire primario y secundario al horno y depuradores o precipitador electrostático
	Oxidación del licor negro fuerte y débil	H_2S	Torres empacadas y ciclones
	Tanque de fusión	Partículas (niebla o polvo)	Eliminadores de nieblas, tipo Venturi, torres empacadas o depuradores de impacto
	Horno de cal	Partículas (polvo), H_2S	Depuradores Venturi
Incineradores municipales e industriales	Incineradores de una sola cámara	Partículas, humo, volátiles, CO, SO_x amoníaco, ácidos orgánicos, aldehídos, NO_x, hidrocarburos, olores, HCl	
	Gases de combustión alimentados		Cámaras de asentamiento, depuradores, postquemador
	Incineradores de cámaras múltiples: tipo retorta, en línea	Partículas humo y contaminantes producto de la combustión	Operación a la capacidad nominal, utilizando combustible auxiliar según se especifica y buen mantenimiento, incluyendo limpieza periódica de la ceniza
	Gases de combustión alimentados	Partículas, humo y contaminantes producto de la combustión	Empleo de puertas de carga y controles automáticos para el tiro
	Desperdicio de madera	Partículas, humo y contaminantes producto de la combustión	Sistemas continuos de alimentación; operación con exceso de aire y a la carga de diseño; limitando la carga de materiales aceitosos
	Incineradores municipales: 50 ton o más al día	Partículas, humo, volátiles, CO, amoniaco, ácidos orgánicos, aldehídos, NO_x, hidrocarburos, SO_x, cloruro de hidrógeno, olores	Preparación de los materiales, que incluye pesado, molienda y desmenuzado; control del área de volteo; diseño del horno con los controles automáticos adecuados; técnicas de arranque apropiadas, mantenimiento de las temperaturas de operación de diseño; uso de precipitadores electrostáticos, depuradores, filtros de bolsas; limpieza adecuada de las cenizas

(*Continuación*)

s de control

s de ventilación, postque-
lspositivo de enfriamiento
nadores, precipitador elec-
os de bolsas, equipo para
tinguir el fuego

o contenido de zinc: em-
s adecuados para la com-
rta para la escoria; latón
nido de zinc: empleo de
udos para la combustión,
le extracción y filtros de
dor

limpio (sin pintura ni gra-
una operación adecuada;
quipo para el control de la
del aire, si no se utilizan
se requiere desgasifica-
le material sucio requiere
acción con depuradores y

ción con ciclones y filtros
a del material limpio (sin
)

dadoso de la escoria

tes para fundición con ba-
le humo

ción, depuradores, filtros

antes que permitan operar
enos de 204°C (400°F) o
racción y postquemadores

en ajuste y velocidades de
as (en algunos casos, la
ede estar muy cerca de la
or consiguiente, la veloci-
debe ser muy elevada), fil-
recipitadores electrostáti-

mpleo del horno de cal, la
combustible sucio o los
ostquemadores

ticos y oxidación térmica
les

combustión del papel para
flujo no restringido de ai-
cundario al horno y depu-
pitador electrostático

y ciclones

ieblas, tipo Venturi, torres
epuradores de impacto
uri

miento, depuradores, post-

acidad nominal, utilizando
xiliar según se especifica y
iento, incluyendo limpie-
la ceniza

de carga y controles auto-
tiro

s de alimentación; opera-
o de aire y a la carga de di-
o la carga de materiales

s materiales, que incluye
da y desmenuzado; con-
volteo; diseño del horno
es automáticos adecuados;
anque apropiadas, mante-
s temperaturas de opera-
uso de precipitadores elec-
uradores, filtros de bolsas;
ada de las cenizas

TABLA 26-3 Técnicas de control aplicables a los procesos unitarios en fuentes importantes de emisiones (*Continuación*)

Industria	Proceso de operación	Contaminantes del aire emitidos	Técnicas de control
	Incineradores patológicos	Olores, hidrocarburos	Técnicas de carga adecuadas
	Desperdicios de madera e industriales	Partículas, humo y contaminantes producto de la combustión	Alimentación del combustible modificado; sistemas de secado y combustible auxiliar; ciclones, depuradores
	Tipo caja	Partículas, humo y contaminantes producto de la combustión	Técnicas de arranque adecuadas; carga lenta del material; no sobrecargar
Fundidoras primarias de metales no ferrosos			
Cobre	Tostado	SO_2, partículas, vapores	Sistema de extracción, cámaras de asentamiento, ciclones o depuradores y precipitadores electrostáticos para el polvo y los vapores, planta de ácido sulfúrico para el SO_2
	Horno de reverbero	Humo, partículas, vapores, SO_2	Sistema de extracción, cámaras de asentamiento, ciclones o depuradores y precipitadores electrostáticos para el polvo y los vapores, planta de ácido sulfúrico para el SO2
	Convertidores: carga, desnatado de la escoria, vertimiento, soplado de aire u oxígeno	Humo, vapores, SO_2	Sistema de extracción, cámaras de asentamiento, ciclones o depuradores y precipitadores electrostáticos para el polvo y los vapores, planta de ácido sulfúrico para el SO2
Plomo	Sinterización	SO_2, partículas, humo	Sistema de extracción, ciclones y filtros de bolsas o precipitadores para el polvo y los vapores, planta de ácido sulfúrico para el SO_2
	Alto horno	SO_2, CO, partículas, óxido de plomo, óxido de zinc	Sistema de extracción, cámaras de asentamiento, postquemador y dispositivo de enfriamiento, ciclones y filtro de bolsas
	Horno de reverbero para escoria	SO_2, partículas, vapores	Sistema de extracción, cámaras de asentamiento, ciclones y dispositivo de enfriamiento, filtro de bolsas
	Pailas de refinación	SO_2, partículas	Sistema local de extracción, dispositivo de enfriamiento, filtro de bolsas o precipitador
Cadmio	Tostadores, escoria, hornos fumantes, hornos de eliminación de plomo	Partículas	Sistema local de extracción, filtros de bolsas o precipitador
Zinc	Tostado	Partículas (polvo) y SO_2	Sistema de extracción, humidificador, ciclones, depuradores, precipitador electrostático y planta de ácido
	Sinterización	Partículas (polvo) y SO_2	Sistema de extracción, humidificador, precipitador electrostático y planta de ácido
	Calcinación	Vapores de óxido de zinc, partículas, SO_2, CO	Sistema de extracción y filtros de bolsas
	Retortas: arco eléctrico		
Fundidoras secundarias de metales no ferrosos	Altos hornos y cubilotes —recuperación del metal a partir del desperdicio y la escoria	Polvo, vapores, partículas, vapor de aceite, humo, CO	Sistema de extracción, dispositivos de enfriamiento, quemadores de CO, filtros de bolsas o precipitadores
	Hornos de reverbero	Polvo, vapores, partículas, humo, gases de materiales fundentes	Sistemas de extracción, filtros de bolsas o precipitadores o depuradores Venturi
	Hornos de secado	Humo, partículas, vapores	Prelimpieza del metal, sistemas de extracción, postquemador y filtros de bolsas
	Combustión de alambre de desperdicio y chatarra de automóviles	Humo, partículas	Depuradores y postquemadores
Fábricas de pintura y barniz	Fabricación de resina: reactor cerrado	Acroleína, otros aldehídos y ácidos grasos (olores), anhídrido ftálico (sublimado)	Sistemas de extracción, depuradores y quemadores de vapores
	Cocción del barniz —recipientes cerrados o abiertos	Cetonas, ácidos grasos, ácido fórmico, ácido acético, glicerina, acroleína, otros aldehídos, fenoles y terpenos; de los residuos aceitosos, sulfuro de hidrógeno, sulfuro de alquilo, butilmercaptano, tiofeno (olores)	Sistema de extracción, depuradores y quemadores de vapores, se requieren campanas con buen ajuste para las pailas abiertas
	Adelgazamiento del disolvente	Olefinas, compuestos aromáticos ramificados, cetonas (olores), disolventes	Sistemas de extracción con quemadores de vapores
Rastros	Almacenamiento del ganado	Olores	Procesamiento rápido, limpieza de todas las superficies de concreto, pavimentación de todas las carreteras de tierra, mantenimiento adecuado del drenaje, torres empacadas
	Dispositivos de cocción y filtros	SO_2, mercaptanos, amoniaco, olores	Sistema de extracción, condensador, depurador o incinerador
	Molienda	Partículas (polvo)	Sistema de extracción y depurador
Plantas de material para techos (saturadores de asfalto)	Saturadores de fieltro o papel: sección de rocío, tanque de asfalto, enlazador húmedo	Vapores de asfalto y partículas (líquidas)	Sistema de extracción con alta velocidad de entrada en las campanas [1.02 m/s(>200 ft/min)]; con depuradores, filtros de bolsas u precipitadores electrostáticos de dos etapas y bajo voltaje
	Manejo de roca triturada u otros minerales	Partículas (polvo)	Sistema local de extracción, ciclón o ciclones múltiples

TABLA 26-3 Técnicas de control aplicables a procesos unitarios en fuentes importantes de emisiones (*Continuación*)

Industria	Proceso de operación	Contaminantes del aire emitidos	Técnicas de control
Laminadoras de acero	Alto horno: carga y vaciado	CO, vapores, humo, partículas (polvo)	Buen mantenimiento, fugas por los sellos, empleo de una razón elevada de mineral granulado o sinterizado, combustión del CO en las calderas de calor de desperdicio, estufas u hornos de coque; ciclones, depuradores, precipitadores electrostáticos o depuradores Venturi
	Hornos eléctricos para acero: carga, vaciado, soplado de oxígeno	Vapores, humo, partículas (polvo), CO	Segregación de la escoria sucia; sistema adecuado de campanas; filtros de bolsas, depuradores Venturi, o precipitador electrostático
	Hornos de hogar abierto: soplado de oxígeno, vaciado	Vapores, humo, SO_x, partículas (polvo), CO, NO_x	Sistema adecuado de campanas, cámaras de asentamiento, caldera de calor de desperdicio, filtros de bolsas, precipitador electrostático o depurador Venturi
	Hornos básicos de oxígeno: soplado de oxígeno	Humo, vapores, CO, partículas (polvo)	Sistema adecuado de campanas (para la captura de las emisiones y el CO diluido), depuradores o precipitador electrostático
	Almacén de materia prima	Partículas (polvo)	Humedecimiento o aplicación de rocío plástico
	Granulación	Partículas (polvo)	Sistema adecuado de campanas, ciclón, filtro de bolsas
	Sinterización	Humo, partículas (polvo), SO_2, NO_x	Sistema adecuado de campanas, ciclones, depuradores Venturi, filtro de bolsas o precipitador

en proporción diversa la salud del hombre. [Amdur, Melvin y Drinker, "Effect of Inhalation of Sulfur Dioxide by Man", *Lancet*, London, **2**, 758 (1953); Barton, Corn, Gee, Vasallo y Thomas, "Response of Healthy Men to Inhaled Low Concentrations of Gas-Aerosol Mixtures", *Arch. Environ. Health*, Chicago, **18**, 681 (1969); Bates, Bell, Burnham, Hazucha y Mantha, "Problems in Studies of Human Exposure to Air Pollutants", *Can. Med. Assoc. J.*, Toronto, **103**, 833 (1970); Ciocco y Thompson, "A Follow-Up of Donora Ten Years After: Methodology and Findings", *Am. J. Public Health*, New York, **51**, 155 (1961); Daly, "Air Pollution and Causes of Death", *Br. J. Prev. Soc. Med.*, London, **13**, 14 (1959); Jaffe, "The Biological Effect of Photochemical Air Pollutants on Man and Animals", *Am. J. Public Health*, New York, **57**, 1269 (1967); New York Academy of Medicine, Committee on Public Health, "Air Pollution and Health", *Bull. N.Y. Acad. Med.*, **42**, 588 (1966); Pemberton y Goldberg, "Air Pollution and Bronchitis", *Br. Med. J.*, London, **2**, 567 (1954); Snell y Luchsinger, "Effect of Sulfur Dioxide on Expiratory Flowrates and Total Respiratory Resistance in Normal Human Subjects", *Arch. Environ. Health*, Chicago, **18**, 693 (1969); Speizer y Frank, "A comparison of Changes in Pulmonary Flow Resistance in Healthy Volunteers Acutely Exposed to SO_2 by Mouth y by Nose", *J. Ind. Med.*, **23**, 75 (1966); Stocks, "Cancer and Bronchitis Mortality in Relation to Atmospheric Deposit and Smoke", *Br. Med. J.*, London, **1**, 74 (1959); Toyama, "Air Pollution and Its Health Effects in Japan", *Arch. Environ. Health*, Chicago, **8**, 153 (1963); U.K. Ministry of Health, "Mortality and Morbidity during London Fog of December 1952" Report on Public Health and Medical Subjects No. 95, London, 1954; U.S. Public Health Service, "Air Pollution in Donora, Pa.: Preliminary Report", Public Health Bull 306.] La contaminación del aire es un factor que contribuye a un incremento en la mortalidad y morbilidad, y causa un inicio prematuro de las enfermedades respiratorias crónicas. Existe evidencia de una relación entre la intensidad de la contaminación y la gravedad de los efectos producidos sobre la salud, así como una correspondencia de la relación existente entre la contaminación y las enfermedades de los órganos afectados. Los contaminantes del aire pueden iniciar y agravar muy diversas enfermedades respiratorias, entre las que se incluye el asma. De hecho, los síntomas del asma pueden considerarse como un desorden de las defensas del cuerpo humano al aire contaminado, causado por irritantes específicos transportados por el aire: pólenes, agentes infecciosos y productos químicos gaseosos y en forma de partículas. La respuesta broncopulmonar a estos irritantes extraños es el espasmo de los bronquios y la hipersecreción; los conductos del aire se obstruyen en forma intermitente y reversible.

Los efectos de los contaminantes del aire sobre la funciones sensoriales y nerviosas en los seres humanos varían considerablemente. Los contaminantes olorosos sólo causan molestias menores, pero si persisten, pueden causar irritación, malestar emocional, anorexia y depresión mental. El monóxido de carbono puede causar la muerte por depresión de los centros respiratorios del sistema nervioso central. Poco antes de la muerte, una exposición repetida y prolongada al monóxido de carbono puede alterar la protección sensorial, la percepción temporal y las funciones mentales superiores. Los aerosoles solubles en los lípidos pueden entrar al cuerpo y absorberse en los lípidos del sistema nervioso central, donde sus efectos pueden persistir mucho tiempo después de terminado el contacto inicial. Ejemplos de agentes con efectos crónicos a largo plazo son los pesticidas a base de fosfatos orgánicos y los aerosoles que contienen metales como plomo, mercurio y cadmio.

Los efectos toxicológicos agudos de la mayor parte de los contaminantes del aire son bien conocidos, pero los efectos producidos por la exposición a mezclas heterogéneas de gases y partículas a muy bajas concentraciones apenas comienzan a entenderse. Para estudiar los efectos de los contaminantes del aire sobre los seres humanos se pueden seguir dos métodos generales: la epidemiología, que intenta relacionar el efecto producido en las grandes poblaciones con la causa, y la investigación de laboratorio, que comienza con la causa y trata de determinar los efectos. Desde el punto de vista ideal, los dos métodos deben complementarse entre sí.

La epidemiología es el más costoso de los dos, requiere gran cuidado en la planeación y, a menudo, su aplicación padece de datos incompletos y falta de controles. Sin embargo, este método tiene una gran ventaja al utilizarlo en los seres humanos, ya que no se ve limitado por barreras morales, como sucede con algunas investigaciones de laboratorio. Por consiguiente, la epidemiología es muy útil y ha producido información considerable. La investigación de laboratorio es menos costosa y sus resultados se pueden verificar por comparación con los controles establecidos y mediante la repetición experimental.

Efectos en los animales Se sigue realizando un trabajo considerable sobre el efecto de los contaminantes en los animales, que incluye, para algunas especies, experimentos que abarcan contaminantes mezclados y sistemas mixtos de gases y aerosoles. En general, este trabajo ha demostrado que los contaminantes mezclados pueden actuar en varias formas diferentes; es decir, pueden producir un efecto aditivo en el que, al sumarse los efectos causados por los contaminantes individuales, se produce un efecto que puede ser mayor al aditivo simple (sinergístico) o menor al aditivo simple (antagonístico), o pueden causar un efecto que difiere en alguna forma del aditivo simple.

El mecanismo por el cual se pueden envenenar los animales es, en muchos casos, totalmente distinto al seguido en los seres humanos. Al igual que en el hombre, la inhalación es una vía importante de entrada

(Continuación)

de control

ugas por los sellos, empleo
la de mineral granulado o
tión del CO en las calderas
cio, estufas u hornos de co-
puradores, precipitadores
itradores Venturi

ia sucia; sistema adecuado
s de bolsas, depuradores
lor electrostático

impanas, cámaras de asen-
: calor de desperdicio, fil-
pitador electrostático o de-

mpanas (para la captura de
O diluido), depuradores o
tático

cación de rocío plástico

ampanas, ciclón, filtro de

mpanas, ciclones, depura-
de bolsas o precipitador

nenores, pero si per-
hal, anorexia y depre-
sar la muerte por de-
ervioso central. Poco
ongada al monóxido
la percepción tempo-
soles solubles en los
s lípidos del sistema
sistir mucho tiempo
plos de agentes con
a base de fosfatos or-
mo plomo, mercurio

parte de los contami-
os producidos por la
rtículas a muy bajas
e. Para estudiar los
res humanos se pue-
gía, que intenta rela-
ones con la causa, y
n la causa y trata de
cal, los dos métodos

quiere gran cuidado
e de datos incomple-
tiene una gran ven-
o se ve limitado por
igaciones de labora-
útil y ha producido
boratorio es menos
omparación con los
perimental.
n trabajo considera-
males, que incluye,
contaminantes mez-
general, este trabajo
ueden actuar en va-
un efecto aditivo en
ntaminantes indivi-
or al aditivo simple
tico), o pueden cau-
vo simple.
los animales es, en
s seres humanos. Al
portante de entrada

en exposiciones agudas de contaminación del aire, como ocurrió en los incidentes del valle de Meusa y en Donora. Sin embargo, la exposición más común para los animales herbívoros que pastan en una zona contaminada es la ingestión de alimento afectado por los contaminantes del aire. En este caso, la inhalación tiene una importancia secundaria.

En consecuencia, los contaminantes que representan un peligro para el ganado son los que absorben la vegetación o se depositan sobre las plantas. Sólo se han observado unos cuantos contaminantes que causan daño a los animales y que incluyen el arsénico, los fluoruros, el plomo y el molibdeno.

Efectos sobre la vegetación La vegetación es más sensible que los animales a muchos de los contaminantes del aire y se han desarrollado métodos que utilizan la respuesta de las plantas para medir e identificar los contaminantes. Los efectos de la contaminación del aire sobre la vegetación pueden ser la muerte, la falta de crecimiento, la reducción en el rendimiento de la cosecha y la degradación del color. Conviene observar que, en algunos casos de daño al color, como por ejemplo el plateado de los vegetales con hojas, producido por los oxidantes, la planta aún puede utilizarse como alimento sin peligro para el consumidor; sin embargo, éste no comprará dichos vegetales por antiestéticos y, en consecuencia, el agricultor sufrirá pérdidas. Entre los contaminantes que pueden ser dañinos para las plantas se tienen el bióxido de azufre, el fluoruro de hidrógeno y el etileno. El daño a las plantas causado por los constituyentes del *smog* fotoquímico se ha estudiado ampliamente y se atribuye al ozono y a los nitratos de peroxiacilo, a los aldehídos de orden superior y a los productos de reacción del ozono con las olefinas. Sin embargo, ninguno de estos casos duplica en forma precisa todos los aspectos del daño observado en el campo y la pregunta permanece abierta a debate y estudio posteriores.

Efectos en los materiales. Es bien conocido el daño que los contaminantes del aire pueden producir en algunos materiales: el ozono del *smog* fotoquímico agrieta el hule, debilita las telas y desvanece las tinturas; el sulfuro de hidrógeno ennegrece la plata; el humo ensucia la ropa lavada y los aerosoles ácidos arruinan las mangueras de nylon. Entre los efectos más importantes se tienen la decoloración, corrosión, ensuciamiento de las mercancías y deterioro de la visibilidad.

1. *Decoloración.* Muchos contaminantes del aire decoloran los edificios y se acumulan sobre ellos. El material con hollín no sólo ennegrece las contrucciones sino que, además, puede acumularse y quedar incrustado, lo cual oculta las líneas y decoraciones, desfigura las estructuras y reduce su apariencia estética. Otro efecto común es la decoloración de la pintura, producida por algunos gases ácidos. Un buen ejemplo lo constituye el ennegrecimiento de la pintura blanca a base de plomo, debido al sulfuro de hidrógeno.

2. *Corrosión.* Un efecto más grave y de gran importancia económica es la acción corrosiva de los gases ácidos sobre los materiales de los edificios. Estos gases hacen que las superficies de piedra se ampollen y descascaren; el mortero puede reducirse a polvo. Los metales también se dañan por la acción corrosiva de ciertos contaminantes. Otro efecto común es el deterioro de los neumáticos y otros productos de hule; cuando estos artículos se exponen al ozono y otros oxidantes, se agrietan y adquieren una apariencia "seca".

3. *Ensuciamiento de las mercancías.* La ropa y los artículos del hogar se pueden ensuciar fácilmente a causa de los contaminantes del aire y, en consecuencia, la limpieza requerida con más frecuencia puede resultar costosa. Además, la limpieza más frecuente acorta habitualmente la vida de los materiales y hace necesario comprar nuevas mercancías con mayor frecuencia.

4. *Deterioro de la visibilidad.* El deterioro de la visibilidad atmosférica (es decir, la disminución del campo visual a través de una atmósfera contaminada) es producto de la dispersión de los rayos del Sol, debida a las partículas suspendidas en el aire y no el resultado de un oscurecimiento de la luz solar causado por los materiales presentes en el aire. Ya que la dispersión de los rayos del Sol y no el oscurecimiento es la causa principal de la reducción de la visibilidad, esta disminución debida a la presencia de contaminantes en el aire ocurre principalmente en días claros. Cuando el día está nublado o por la noche, el efecto quizá no se observe, a pesar de que exista la misma concentración de partículas que la existente en días soleados. La reducción de la visibilidad crea varios problemas y los más importantes son los efectos adversos sobre los aviones, las carreteras y las operaciones portuarias. La visibilidad reducida también puede causar impresiones estéticas adversas, que afecten el crecimiento y desarrollo de la zona. Las condiciones extremas, como por ejemplo las tormentas de polvo y arena, pueden causar daño físico por sí mismas.

LEYES, REGLAMENTOS Y OFICINAS GUBERNAMENTALES DE ESTADOS UNIDOS

A pesar de que desde la década de 1950 se han promulgado muchas leyes federales relacionadas con la contaminación del aire, el marco estatutario básico actualmente en vigor fue establecido por la Clean Air Act (Ley de Aire Limpio) de 1970, enmendada en 1974, para cubrir los aspectos relacionados con la energía, y nuevamente en 1977 cuando se adoptaron una serie de reformas que contienen aspectos particularmente importantes, relacionados con la aprobación de nuevas plantas industriales.

Clean Air Act de 1970 Esta ley se basó en el concepto de lograr los estándares nacionales de la calidad del aire ambiente [National Ambient Air Quality Standars (NAAQS)]. Se acumularon y analizaron datos para establecer cuál era realmente la calidad del aire, identificar las fuentes de contaminación, determinar cómo se dispersan e interactúan los contaminantes en el aire ambiente y definir las reducciones y controles necesarios para lograr los objetivos de calidad del aire.

EPA promulgó el conjunto básico de normas o estándares actuales de calidad del aire ambiente en abril de 1971. Los contaminantes específicos reglamentados fueron las partículas, el bióxido de azufre, los oxidantes fotoquímicos, los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. En 1978 se agregó el plomo. En la tabla 26-4 aparecen las normas actuales.

Para disponer de unidades geográficas básicas, necesarias en los programas de control de la contaminación del aire, Estados Unidos se dividió en 247 zonas para el control de la calidad del aire. Mediante un

TABLA 26-4 Estándares primario y secundario de Estados Unidos sobre la calidad del aire, 1983

Contaminante	Tiempo promedio	Estándar primario	Estándar secundario
Óxidos de azufre	Media aritmética anual	80 $\mu g/m^3$ (0.03 ppm)	
	24 h	365 $\mu g/m^3$ (0.14 ppm)	
	3 h		1 300 $\mu g/m^3$ (0.5 ppm)
Partículas	Media geométrica anual	75 $\mu g/m^3$	60 $\mu g/m^3$
	24 h	260 $\mu g/m^3$	150 $\mu g/m^3$
Monóxido de carbono	8 h	10 mg/m^3	Igual al estándar primario
	1 h	40 mg/m^3 (35 ppm)	
Ozono (corregido por NO_2 y SO_2)	1 h	240 $\mu g/m^3$ (0.12 ppm)	Igual al estándar primario
Hidrocarburos (corregidos por metano)	3 h	160 $\mu g/m^3$ (0.24 ppm)	Igual al estándar primario
Óxidos de nitrógeno	Media aritmética anual	100 $\mu g/m^3$ (0.05 ppm)	Igual al estándar primario
Plomo	3 meses	1.5 $\mu g/m^3$	Igual al estándar primario
Oxidantes fotoquímicos (expresados como ozono)	1 h	160 $\mu g/m^3$ (0.08 ppm)	Igual al estándar primario

NOTA: El estándar de Estados Unidos, salvo los basados en las medias aritméticas o geométricas anuales, no debe excederse más de una vez al año.

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
Subparte D: **Generadores de vapor operados con combustibles fósiles y una capacidad >73 MW** Entrada de calor (> 250 millones de Btu/h) Propuesto 8/17/71 (36FR 15703) Publicado 12/23/71 (36 FR24876)	Calderas operadas con carbón[b]	Partículas Opacidad SO_2	0.10 lb millón Btu 20% (27% para 6 min/h) 1.20 lb/millón Btu	No requiere Continuo Continuo
		NO_x Carbón de antracita, bituminoso o subbituminoso Lignito[c]	 0.70 lb/millón Btu 0.60 lb/millón Btu	Continuo
Revisado 7/26/72 (37 FR 14877) 6/14/74 (39 FR 20790) 1/16/75 (40 FR 2803) 10/6/75 (40 FR 46250) 8/15/77 (42 FR 41122) 12/15/77 (42 FR 61537) 3/7/78 (43 FR 9276)		Más de 25% de residuo de carbón	Exento	
	Calderas operadas con gas o petróleo	Partícula Opacidad SO_2—petróleo NO_x—petróleo NOx—gas	0.10 lb millón Btu 20% (27% para 6 min/h) 0.80 lb/millón Btu 0.30 lb/milltn Btu 0.20 lb/millón Btu	No requiere Continuo Continuo Continuo Continuo
Subparte *Da*: **Unidades generadoras de vapor para empresas productoras de electricidad, con capacidad >73 MW** Entrada de calor (>250 millones de Btu/h) Propuesto 9/19/78 (43 FR 42154) Publicado 6/11/79 (44 FR 33580)	Calderas operadas con carbón (y combustibles derivados del carbón)	Partículas Opacidad	0.03 lb/millón Btu 20% (27% para 6 min/h)	No requiere Continuo
		SO_2	1.2 lb/millón de Btu[d] y 90% de reducción[e], excepto 70% de reducción cuando las emisiones son inferiores a 0.6 lb/millón de Btu[e]	Aca'amiento continuo
		NO_x[g] Carbón de antracita, bituminoso, lignito[c]	0.60 lb/millón Btu	Acatamiento continuo
		Carbón subbituminoso	0.50 lb/millón Btu	
		Combustibles derivados del carbón y aceite de esquistos	0.50 lb/millón Btu	
		Más de 25% de residuo de carbón	Exento	
	Calderas operadas con gas o petróleo	Partículas Opacidad	0.03 lb/millón Btu 20% (27% para 6 min/h)	No requiere Continuo
		SO_2	0.80 lb/millón Btu y 90% reducción[e] o 0.20 lb/ millón Btu (no requiere reducción)	Acatamiento continuo
		NO_x—petróleo	0.30 lb/millón Btu	Acatamiento continuo
		NO_x—petróleo	0.20 lb/millón Btu	Acatamiento continuo
Subparte E: **Incineradores** (> 50 ton/día) Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703) Publicado 12/23/71 (36 FR 24876) Revisado 6/14/74 (39 FR 20790)	Incineradores	Partículas	0.80 gr/dscf corregido para 12% de CO_2	No requiere
Subparte F: **Plantas de cemento Portland** Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703)	Horno	Partícula Opacidad	0.30 lb/ton 20%	No requiere No requiere
	Enfriador de escoria	Partículas	0.10 lb/ton	No requiere
Publicado 12/23/71 (36 FR 24876) Revisado 6/14/74 (39 FR 20790) 11/12/74 (39 FR 39874) 10/6/75 (40 FR 46250)	 Fugaz Puntos de emisión	Opacidad Opacidad	10% 10%	No requiere No requiere

TABLA 26-5 Est

Categoría de la fuet
Subparte G: **Plantas de ácido nítri** Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703 Publicado 12/23/71 (36 FR 2487 Revisado 5/23/73 (38 FR 13562 6/14/74 (39 FR 20790 10/6/75 (40 FR 46250
Subparte H: **Plantas de ácido sulf** Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703 Publicado 12/23/71 (36 FR 2487 Revisado 5/23/73 (38 FR 1356 6/14/74 (39 FR 2079 10/6/75 (40 FR 4625
Subparte I: Plantas de creto y de asfalto Propuesto 6/11/73 (38 FR 1540 Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 10/6/75 (40 FR 4625
Subparte J: **Refinerías de petról** Propuesto 6/11/73 (38 FR 1540 Publicado 3/8/74/ (39 FR 9308) Revisado 10/6/75 (40 FR 4625 6/24/77 (42 FR 3242 3/15/78 (43 FR 1086 3/12/79 (44 FR 1348
Subparte K: **Recipientes de almacenamiento pa líquidos derivados petróleo** Construidos despué 6/11/73 y antes de 5/ Propuesto 6/11/73 (38 FR 154 Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 4/17/74 (39 FR 137 6/14/74 (39 FR 207 4/4/80 (45 FR 2337
Subparte Ka: **Recipientes de alm miento para líquid vados del petróleo** Construidos después d mayo de 1978 Propuesto 5/18/78 (43 FR 216 Publicado 4/4/80 (45 FR 2337

Requerimiento de monitoreo[a]

requiere
ntinuo
ntinuo

ntinuo

requiere
ntinuo
ntinuo
ntinuo
ntinuo

requiere
ntinuo

a'amiento
continuo

atamiento
continuo

o requiere
ontinuo
catamiento
continuo

catamiento
continuo
catamiento
continuo

o requiere

o requiere
o requiere

o requiere

o requiere
o requiere

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60 (*Continuación*)

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
Subparte G: **Plantas de ácido nítrico** Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703) Publicado 12/23/71 (36 FR 24876) Revisado 5/23/73 (38 FR 13562) 6/14/74 (39 FR 20790) 10/6/75 (40 FR 46250)	Equipo de proceso	Opacidad NO_x	10% 3.0 lb/ton	No requiere Continuo
Subparte H: **Plantas de ácido sulfúrico** Propuesto 8/17/71 (36 FR 15703) Publicado 12/23/71 (36 FR 24876) Revisado 5/23/73 (38 FR 13562) 6/14/74 (39 FR 20790) 10/6/75 (40 FR 46250)	Equipo de proceso	SO_2 Niebla de ácido Opacidad	4.0 lb/ton 0.15 lb/ton 10%	Continuo No requiere No requiere
Subparte I: Plantas de concreto y de asfalto Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406) Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 10/6/75 (40 FR 46250)	Secadores, sistemas de pesado y cribado, sistemas de almacenamiento, transferencia y carga: equipo de manejo de polvo	Partículas Opacidad	0.04 gr/dscf (90 mg/dscm 20%	No requiere No requiere
Subparte J: **Refinerías de petróleo** Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406) Publicado 3/8/74/ (39 FR 9308) Revisado 10/6/75 (40 FR 46250) 6/24/77 (42 FR 32426) 3/15/78 (43 FR 10866) 3/12/79 (44 FR 13480)	Unidad de fraccionamiento catalítico fluido, regenerador del catalizador	Partículas Opacidad CO	1.0 lb/1000 lb de coque quemado 30% (exención de 6 min) 0.05%	No requiere Continuo Continuo[h]
	Dispositivos de combustión del gas combustible	SO_x H_2S	0.10 gr/dscf 230 mg/dscm	Continuo Continuo[h]
	Plantas de recuperación de azufre	SO_2 Compuestos de azufre reducido y H_2S	0.025% (a 0% oxígeno) 0.030% (a 0% oxígeno) 0.0010% (a 0% oxígeno)	Continuo Continuo[h] Continuo[h]
Subparte K: **Recipientes de almacenamiento para líquidos derivados del petróleo** Construidos después de 6/11/73 y antes de 5/19/78 Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406) Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 4/17/74 (39 FR 13776) 6/14/74 (39 FR 20790) 4/4/80 (45 FR 23373)	Tanques de almacenamiento > 40 000 gal y > 65 000 gal de capacidad, construidos después de 3/8/74 y antes de 5/19/78 > 65 000 gal, construidos después de 6/11/73 y antes de 5/19/78	VOC	Equipo estándar[m]	No requiere
Subparte Ka: **Recipientes de almacenamiento para líquidos derivados del petróleo** Construidos después del 18 de mayo de 1978 Propuesto 5/18/78 (43 FR 21615) Publicado 4/4/80 (45 FR 23373)	Recipientes de almacenamiento > 40 000 gal de capacidad construidos después de 5/18/78 Recipientes de almacenamiento > 420 000 gal de capacidad, para petróleo o condensado almacenado, procesado o tratado, antes de la transferencia de seguridad, *sin* afectar la instalación y exentos	VOC	Equipo estándar[n]	Ninguno

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60 (*Continuación*)

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
Subparte L: **Fundidoras secundarias de plomo**	Altos hornos y hornos de reverbero	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406)		Opacidad	20%	No requiere
	Hornos de crisol	Opacidad	10%	No requiere
Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 4/17/74 (39 FR 13776) 10/6/75 (40 FR 46250)				
Subparte M: **Plantas secundarias de bronce y latón**	Hornos de reverbero	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406)		Opacidad	20%	No requiere
	Altos hornos y hornos eléctricos	Opacidad	10%	No requiere
Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 10/6/75 (40 FR 46250)				
Subparte N: **Plantas de hierro y acero**	Hornos del proceso básico de oxígeno	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406)		Opacidad	10%	Pérdida de presión en el depurador
Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 4/13/78 (43 FR 15600)			20% en cada ciclo de producción	Presión de agua
Subparte O: **Plantas de tratamiento de aguas negras**	Incineradores de sedimento	Partículas	1.30 lb/ton	Masa o volumen del sedimento: masa de los desperdicios sólidos municipales, si existen
Propuesto 6/11/73 (38 FR 15406)		Opacidad	20%	No requiere
Publicado 3/8/74 (39 FR 9308) Revisado 4/17/74 (39 FR 13775) 5/3/74 (39 FR 15396) 10/6/75 (40 FR 46250) 11/10/77 (42 FR 58520)				
Subparte P: **Fundidoras primarias de cobre**	Secador	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 10/16/74 (39 FR 37039)		Opacidad	20%	Continuo
	Tostador, horno de fusión, * convertidor de cobre	SO_2	0.065%	Continuo
Publicado 1/15/75 (41 FR 2331)		Opacidad	20%	No requiere
Revisado 2/26/76 (41 FR 8346) 11/1/77 (42 FR 125)	* Hornos de reverbero que procesan las altas impurezas de la alimentación, los materiales están exentos de SO_2 estándar			
Subparte Q: **Fundidoras primarias de zinc**	Máquina de sinterización	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 10/16/74 (39 FR 37039)		Opacidad	20%	Continuo
Publicado 1/15/76 (41 FR 2331)	Tostador	SO_2	0.065%	Continuo
		Opacidad	20%	No requiere
Subparte R: **Fundidoras primarias de plomo**	Alto horno u horno de reverbero, máquina de sinterización en el extremo terminal	Partículas	0.022 gr/dscf (50 mg/dscm	No requiere
Propuesto 10/16/74 (39 FR 37039)		Opacidad	20%	Continuo
Publicado 1/15/76 (41 FR 2331)	Máquina de sinterización, horno eléctrico, convertidor	SO_2	0.065%	Continuo
		Opacidad	20%	No requiere

TABLA 26-5 Está

Categoría de la fue
Subparte S: **Plantas primarias de r de aluminio**
Propuesto 10/23/74 (39 FR 37729) Publicado 1/26/76 (41 FR 3825)
6/30/80 (45 FR 44296)
Subparte T: **Plantas de fertilizante fosfatados** Propuesto 10/22/74 (39 FR 37601 Publicado 8/6/75 (40 FR 33152)
Subparte U:
Subparte V:
Subparte W:
Subparte X:
Subparte Y: **Plantas de preparació** Propuesto 10/24/74 (39 FR 3792 Publicado 1/15/76 (41 FR 2232)
Subparte Z: **Instalaciones para la de aleaciones ferros** Propuesto 10/21/74 (39 FR 374 Publicado 5/4/75 (41 FR 18497 Revisado 5/20/76 (41 FR 2065
Subparte AA: **Fundidoras de hier** Propuesto 10/21/74 (39 FR 374 Publicado 9/23/75 (40 FR 438

Requerimiento de monitoreo[a]
uiere
uiere
uiere
uiere
uiere
uiere
uiere
la de presión
l depurador
n de agua
o volumen del
imento: masa de los
perdicios sólidos
nicipales, si existen
quiere
quiere
nuo
nuo
quiere
quiere
nuo
nuo
quiere
quiere
nuo
nuo
quiere

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60 (*Continuación*)

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
Subparte S: **Plantas primarias de reducción de aluminio**	Grupo Protoom *a*) Planta de Soderberg	*a*) Fluoruros totales	2.0 lb/ton	No requiere
		Opacidad	10%	No requiere
Propuesto 10/23/74 (39 FR 37729)	*b*) Planta de prehorneado	*b*) Fluoruros totales	1.9 lb/ton	No requiere
Publicado 1/26/76 (41 FR 3825)		Opacidad	10%	No requiere
	Plantas de horneado de los ánodos	Fluoruros totales	0.1 lb/ton	No requiere
6/30/80 (45 FR 44296)		Opacidad	20%	No requiere
Subparte T: **Plantas de fertilizantes fosfatados** Propuesto 10/22/74 (39 FR 37601) Publicado 8/6/75 (40 FR 33152)	Proceso húmedo con ácido fosfórico	Fluoruros totales	0.02 lb/ton	Caída de presión total a través del sistema de depuración
Subparte U:	Acido superfosfórico	Fluoruros totales	0.01 lb/ton	Caída de presión total a través del sistema de depuración
Subparte V:	Fosfato diamónico	Fluoruros totales	0.06 lb/ton	Caída de presión total a través del sistema de depuración
Subparte W:	Superfosfato triple	Fluoruros totales	0.2 lb/ton	Caída de presión total a través del sistema de depuración
Subparte X:	Superfosfato triple granular	Fluoruros totales	$(5.0)(10^{-4})$ lb/(h·ton)	Caída de presión total a través del sistema de depuración
Subparte Y: **Plantas de preparación de carbón** Propuesto 10/24/74 (39 FR 37921)	Secador térmico	Partículas	0.031 gr/dscf (0.070 g/dscm)	Temperatura pérdida de presión en el depurador Presión de agua
Publicado 1/15/76 (41 FR 2232)		Opacidad	20%	No requiere
	Equipo neumático para la limpieza del carbón	Partículas	0.018 gr/dscf (0.040 g/dscm)	No requiere
		Opacidad	10%	No requiere
	Equipo de procesamiento y transporte, sistemas de almacenamiento, sistemas de transferencia y carga	Opacidad	20%	No requiere
Subparte Z: **Instalaciones para la producción de aleaciones ferrosas** Propuesto 10/21/74 (39 FR 37469)	Hornos de arco eléctrico sumergido	Partículas	0.99 lb/MWh (0.45 kg/MWh) ("aleaciones de alto contenido de silicio"); 0.51 lb/MWh (0.23 lb/MWh) (aleaciones de cromo y manganeso)	No requiere
Publicado 5/4/75 (41 FR 18497)			Pueden escapar emisiones no visibles del sistema de captura del horno	Monitoreo de la velocidad de flujo en la campana
Revisado 5/20/76 (41 FR 20659)			Pueden escapar emisiones no visibles del sistema de decantación para > 40% de cada periodo de decantación	Monitoreo de la velocidad de flujo en la campana
		Opacidad	15%	Continuo
		CO	20% base volumen	No requiere
	Equipo para el manejo de polvo	Opacidad	10%	No requiere
Subparte AA: **Fundidoras de hierro y acero**	Hornos de arco eléctrico	Partículas	0.0052 gr/dscf (12 mg/dscm)	No requiere
Propuesto 10/21/74 (39 FR 37465) Publicado 9/23/75 (40 FR 43850)		Opacidad		
		a) dispositivo de control	3%	Continuo
		b) techo del taller	0, excepto 20% —carga 40%—decantación	Monitoreo de la velocidad de flujo en la campana

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60 (*Continuación*)

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
	Equipo de manejo de polvo	Opacidad	10%	Monitoreo de la presión en el sistema DSE
Subparte BB: **Molinos de pulpa de papel** (Operaciones de pulpa de papel con neutralización de sulfito y molinos semiquímicos de pulpa.) Propuesto 9/24/76 (41 FR 42012) Publicado 2/23/78 (43 FR 7568) Revisado 8/7/78 (43 FR 34784) 1/12/79 (44 FR 2578)	Sistemas del digestor, lavador, evaporador, separador de condensado, u oxidación del licor negro	Azufre total reducido (TRS)	5 ppm en volumen, en base seca, corregido para el contenido específico de oxígeno	Continuo[h] Continuo[h]
	Hornos de recuperación directa de pulpa	TRS	5 ppm en volumen, en base seca, corregido para el 8% de oxígeno	
	Hornos de recuperación transversal	TRS	25 ppm en volumen, en base seca, corregido para el 8% de oxígeno	Continuo[h]
	Tanques de fusión	TRS	0.0084 g/kg de sólidos del licor negro (base seca) [0.0168 lb/ton de sólidos del licor negro (base seca)]	Continuo[h]
	Hornos de cal	TRS	8 ppm en volumen, en base seca, corregidos para el 10% de oxígeno	Continuo[h]
	Cualquier horno de recuperación	Partículas	0.10 g/m^3 estándar (0.044 $granos/ft^3$ estándar), corregidos para el 8% de oxígeno	No requiere
	Tanques de fusión	Opacidad Partículas	35% 0.1 g/kg de sólidos del licor negro (base seca) [0.2 lb/ton de sólidos del licor negro (base seca)]	Continuo Medición continua de la pérdida de presión, cuando se emplea un dispositivo depurador para el control de emisiones
	Hornos de cal	Partículas	0.15 g/m^3 estándar (0.067 $granos/ft^3$ estándar), corregidos para el 10% de oxígeno, cuando se utilizan combustibles fósiles gaseosos 0.30 g/m^3 estándar (0.13 $granos/ft^3$ estándar), corregidos para el 10% de oxígeno, cuando se utilizan combustibles fósiles líquidos	Medición continua de la pérdida de presión, cuando se emplea un dispositivo depurador para el control de emisiones
Subparte CC: **Fábricas de vidrio** Propuesto 6/15/79 (44 FR 34840) Publicado 10/7/80 (45 FR 66751) **Se llenaron las peticiones para reconsideración.**	Hornos de fusión de vidrio	Partículas	Las velocidades varían	Ninguna
Subparte DD: **Elevadores de granos**[i,j] Propuesto 1/13/77 (42 FR 2842) 6/24/77 (42 FR 32264) Propuesta suspendida 8/3/78 (43 FR 34349) Propuesta reinstalada Publicado 8/3/78 (43 FR 34340)	Todas las instalaciones listadas abajo	Partículas	0.01 gr/dscf	No requiere
	Estaciones de carga de camiones	Opacidad	10%	No requiere
	Estaciones de descarga de camiones	Opacidad	5%	No requiere
	Estaciones de carga de barcos o lanchones	Opacidad	20%	No requiere
	Estaciones de descarga de barcos o lanchones		Equipo estándar[k]	No requiere
	Estaciones de carga de vagones de ferrocarril	Opacidad	5%	No requiere
	Estaciones de descarga de vagones de ferrocarril	Opacidad	5%	No requiere
	Secadores de granos Secadores de columna, que tengan platos perforados con un diámetro de orificio mayor a 0.094 in Secadores de charolas, con filtros de mallas de más de 50 mallas	Opacidad	0%	No requiere
	Operaciones de manejo de granos	Opacidad	0%	No requiere

TABLA 26-5 Está

Categoría de la fue

Subparte GG:
Turbinas de gas —entr
calor a carga máxima ig
mayor que 10.7 GJ/h
(~ 1000 hp)

Propuesto
Oct. 3, 1977 (42 FR 537
Publicado
Sept. 10, 1979 (44 FR 5
Estándar bajo petición de r

*Revisión propuesta el 4/

Subparte HH:
Fábricas de cal

Propuesto
5/3/77 (42 FR 22506)
Publicado
3/7/78 (43 FR 9452)

Subparte MM:
Operaciones de pint
superficie de automó
camiones ligeros

Propuesto
10/5/79 (44 FR 57792

Publicado
12/24/80 (45 FR 8541

Subparte PP:
Fabricación de sulf
de amonio

Propuesto
2/4/80 (45 FR 7758)
Publicado
11/12/80 (45 FR 748

[a] Sólo se utilizan m
[b] Incluye las caldera
[c] Si el horno de sang
Btu.
[d] Para el requerimie
[e] El requerimiento
menos de 25% de comb
[f] Promedio de lamir
[g] Se dispone de perr
(SO_2) y 0.70 lb/millón
[h] No procede hasta
[i] Para terminales de
trigo, maíz, sorgo, arro
[j] Para elevadores de
y que manejan o proce
[k] Brazo marino tota
de aire por bushel de g
[m] Para presiones de
con sistema de recuper
[n] Para presiones de
Federal para los reque
[o] Para techo fijo co
[o] Para presiones de
vapor, diseñado para e
[o] El equivalente de

TABLA 26-5 Estándares de funcionamiento, 40 CFR parte 60 (*Continuación*)

Categoría de la fuente	Instalación afectada	Contaminante	Nivel de emisión	Requerimiento de monitoreo[a]
Subparte GG: **Turbinas de gas** —entrada de calor a carga máxima igual o mayor que 10.7 GJ/h (~ 1000 hp) Propuesto Oct. 3, 1977 (42 FR 53788) Publicado Sept. 10, 1979 (44 FR 52798) Estándar bajo petición de revisión*	Turbinas sencillas con ciclo de regeneración de gas y la porción de turbina de gas que forma parte de un sistema de generación eléctrica con ciclo combinado de vapor*	NO_x SO_2	Véase 44 FR 52798	Monitoreo continuo de la razón agua-combustible Monitoreo del contenido de azufre y nitrógeno del combustible
*Revisión propuesta el 4/15/81 (46 FR 22005). Revisa la aplicabilidad del estándar en relación con las turbinas industriales de gas.				
Subparte HH: **Fábricas de cal**	Hornos rotatorios de cal	Partículas	0.30 lb/ton	Pérdida de presión en el depurador; suministro de presión al líquido del depurador
Propuesto 5/3/77 (42 FR 22506)		Opacidad	10%	Continuo
Publicado 3/7/78 (43 FR 9452)	Hidratadores de cal	Partículas	0.15 lb/ton	Velocidad de flujo del líquido del depurador; energía eléctrica utilizada por el depurador
Subparte MM: **Operaciones de pintura de la superficie de automóviles y camiones ligeros** Propuesto 10/5/79 (44 FR 57792)	Operaciones de primera mano de pintura Operaciones de la mano guía de pintura Operaciones de la última mano de pintura Están exentos de estas provisiones: las operaciones de pintura de los componentes de plástico o los automóviles de plástico o los camiones ligeros en líneas de pintura separadas	VOC	0.16 kg de VOC por litro de los sólidos de la pintura aplicada en cada operación de la primera mano de pintura 1.40 kg de VOC por litro de los sólidos de la pintura aplicada en cada operación de la pintura guía	La temperatura del incinerador (si existe)
Publicado 12/24/80 (45 FR 85414)			1.47 kg de VOC por litro de los sólidos de la pintura aplicada, en cada operación de la última mano de pintura	
Subparte PP: **Fabricación de sulfato de amonio** Propuesto 2/4/80 (45 FR 7758) Publicado 11/12/80 (45 FR 74846)	Secador de sulfato de amonio dentro de la fábrica de sulfato de amonio con caprolactam sintético como subproducto y los sectores de subproductos del horno de coque	Partículas Opacidad	0.15 kg/Mg (0.30 lb/ton) 15%	Suministrense dispositivos para monitorear el flujo o básculas para pesar las corrientes del material de alimentación Monitorear la caída de presión en el dispositivo de control

[a] Sólo se utilizan monitoreos continuos para determinar el exceso de emisiones, a menos que se lea "acatamiento continuo"

[b] Incluye las calderas operadas con mezclas de carbón y madera.

[c] Si el horno de sangrado de escoria se opera con más de 25%de lignito extraído de las minas de Dakota del Sur, Dakota del Norte o Montana, el estándar es 0.80 lb/millón de Btu.

[d] Para el requerimiento SRC-1 se aplica con 85% de reducción (24 h promedio).

[e] El requerimiento del porcentaje de reducción no se aplica a instalaciones que operan con 100% de antracita, a las instalaciones de recuperación del recurso que operan con menos de 25% de combustibles fósiles (90 días promedio) o a las instalaciones ubicadas en zonas no continentales.

[f] Promedio de laminación de 30 días, salvo donde se observa otra cosa.

[g] Se dispone de permisos de demostración comercial a 1.20 lb/millón de Btu y 80% de reducción de SRC-1 (SO_2) (24 h); para 1:20 lb/millón de Btu y 85% de reducción de FBC (SO_2) y 0.70 lb/millón de Btu de carbón licuado (NO_x).

[h] No procede hasta que las especificaciones de funcionamiento del monitor se hayan propuesto y publicado.

[i] Para terminales de elevadores de granos (es decir, elevadores de granos con una capacidad permanente de almacenamiento mayor a 2 500 000 bu) y que manejan o procesan trigo, maíz, sorgo, arroz, cebada, avena, centeno o soya.

[j] Para elevadores de almacenamiento de grano en molinos de trigo, de maíz húmedo, de maíz seco (consumo humano), molinos de arroz, plantas de extracción de aceite de soya y que manejan o procesan trigo, maíz, sorgo, arroz, centeno, avena, cebada o soya, con una capacidad permanente de almacenamiento de grano superior a 1 millón de bu.

[k] Brazo marino totalmente cerrado desde la parte superior hasta el fondo, con una velocidad de flujo de ventilación, tanto en el brazo como en la tolva de recepción, de 40 ft^3 de aire por bushel de grano descargado.

[m] Para presiones de vapor de 78 a 570 mmHg, equípese con techo flotante y sistema de recuperación de vapor o su equivalente; para presiones de vapor > 570 mmHg, equípese con sistema de recuperación de vapor o su equivalente.

[n] Para presiones de vapor de 10.3 kPa (1.5 psia) pero no mayores a 75.6 kPa (11.1 psia), equípese con techo externo flotante y sellos primarios y secundarios (véase el *Registro Federal* para los requerimientos de sello de la abertura).

o Para techo fijo con cubierta interna flotante, equípese con dispositivo de cierre continuo.

o Para presiones de vapor de 76.6 kPa, equípese con un sistema de recuperación de vapor que recolecte todos los vapores y gases de VOC y un sistema de retorno o desecho de vapor, diseñado para eliminar 95% en peso.

o El equivalente de uno de los anteriores.

análisis retrospecti‹›o de las normas, se estimó la cantidad total de contaminación por zonas y posteriormente se calculó la cantidad total de contaminación que podía tolerarse sin exceder las normas. A continuación se determinó el nivel de reducción requerido. EPA solicitó a los diferentes estados el desarrollo de planes estatales de ejecución, a fin de lograr los objetivos.

La ley también hizo que EPA estableciera las normas de funcionamiento para nuevas fuentes (NSPS), divididas en categorías industriales específicas. Se requirió a las nuevas plantas que utilizaran el mejor sistema disponible para la reducción de emisiones. EPA publicó gradualmente estos estándares, que en la actualidad cubren un número básico de categorías industriales (véase la tabla 26-5). Las reformas de 1977 a la Clean Air Act hicieron que EPA acelerara la aplicación del programa NSPS e incluyera un programa reglamentario, para prevenir un deterioro significativo en aquellas zonas del país donde las normas nacionales de calidad del aire se estaban alcanzando.

Por último, la Sección 112 de la Clean Air Act requirió que EPA promulgara las National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (Normas Nacionales de Emisiones Relacionadas con los Contaminantes Peligrosos de Aire) (NESHAPs). En consecuencia, se promulgaron normas para el asbesto, berilio, mercurio y cloruro de vinilo (véase la tabla 26-6). En la actualidad se prepara una proposición NESHAP para el benceno y también se está considerando el cadmio, el arsénico, el cobre y la materia orgánica policíclica.

Prevención de deterioro significativo (PSD) De todas las leyes federales que establecen controles para el medio ambiente en la industria (y en particular para plantas nuevas) quizás la parte más confusa y restrictiva sean los límites impuestos para la prevención de un deterioro significativo (PSD) de la calidad del aire. Estos límites se aplican a zonas del país cuya atmósfera ya está más limpia que lo requerido por los estándares de calidad del aire. Este marco reglamentario se desarrolló mediante acción judicial y administrativa, con base en la Clean Air Act de 1970, y posteriormente, se le dio una base estatutaria formal, mediante las Clean Air Act Amendments de 1977.

EPA estableció un esquema de clasificación de áreas, que se aplicó en todas estas zonas. El concepto básico fue permitir un desarrollo industrial moderado, pero no lo suficiente para degradar la calidad del aire hasta un punto en el que apenas se cumpliera con las normas. Además, se permitió a los estados la designación de ciertas zonas en las que se deseaba una calidad original del aire. Todas las zonas de calidad del aire se calificaron por categorías como clase I, Clase II o Clase III. Las zonas de clase I eran áreas con una calidad original y sujetas al control más riguroso; se les dio carácter permanente e incluyeron los parques internacionales, las áres silvestres nacionales y los parques conmemorativos con una superficie mayor a 5000 acres, así como los parques nacionales mayores a 6000 acres. A pesar de que la naturaleza de estas zonas es tal que los proyectos industriales no se instalarán en ellas, su categoría de Clase I puede afectar los proyectos en áreas vecinas, donde las condiciones metereológicas pueden dar por resultado un transporte de las emisiones a dichas zonas. Las áreas de Clase II son regiones donde se permite un crecimiento industrial moderado y las de Clase III son las zonas de mayor industrialización. En los reglamentos de EPA, promulgados en diciembre de 1974, todas las zonas se clasificaron inicialmente como Clase II, pero se permitió que los estados reclasificaran áreas específicas como Clase I o Clase III.

Los reglamentos de EPA establecieron también otro concepto crítico, conocido como "incremento", que es la definición numérica de la cantidad de contaminación adicional que puede permitirse por lo efectos combinados del nuevo crecimiento en un lugar específico (véase la tabla 26-7). Para asegurar que los incrementos no se utilizaran en forma precipitada, EPA especificó que cada planta nueva importante debería instalar la mejor tecnología de control disponible (BACT) para limitar las emisiones. Con esto se reforzó la misma política sustentada en las NSPS y, donde se ha promulgado una NSPS, ésta controla las determinaciones de la BACT. Donde las normas no han sido promulgadas, se requerirá una determinación adecuada de la BACT para cada caso.

Para poner en práctica estos controles, EPA requirió que cada planta nueva se sometiera a una revisión previa a la construcción. Los reglamentos prohíben que las empresas inicien la construcción de una nueva planta hasta terminar la revisión y, como parte del procedimiento de la revisión, que la construcción se haga pública y se tomen las provisiones necesarias para una audiencia pública, sobre cualquier aspecto en disputa.

Fuentes sujetas a la prevención de un deterioro significativo (PSD) Las fuentes sujetas a los reglamentos PSD (40 CFR, Secc. 52.21, agosto 7, 1980) son las fuentes estacionarias importantes y las modificaciones mayores que se realizan en zonas de cumplimiento y en áreas no clasificadas. Una fuente estacionaria importante se define como cualquiera de las fuentes listadas en la tabla 26-8, con un potencial de emisión de 100 ton o más por año de cualquier contaminante reglamentado en la Clean Air Act (CAA), o bien cualquier otra fuente con un potencial de emisión de 250 ton o más por año de cualquier contaminante reglamentado en CAA. El "potencial de emisión" se define como la capacidad máxima para emitir el contaminante bajo las normas o estándares aplicables de las emisiones y las condiciones de la licencia (después de la aplicación de cualquier equipo de control de la contaminación del aire), sin incluir las emisiones secundarias. Una "modificación mayor" se define como cualquier cambio físico o de operación de una fuente estacionaria importante que produce un "incremento significativo de las emisiones totales" de cualquier contaminante reglamentada en CAA (véase la tabla 26-9).

Se requiere un monitoreo continuo de todos los contaminantes reglamentados en CAA, con emisiones superiores o iguales a los valores que aparecen en la tabla 26-9 para los que existen NAAQS (salvo los hidrocarburos). El monitoreo continuo también se requiere para otros contaminantes reglamentados en CAA, si EPA o el estado determina que es necesario el monitoreo. EPA o el estado pueden eximir el monitoreo de cualquier contaminante reglamentado en CAA, si el impacto máximo sobre la calidad del aire debido al incremento de las emisiones es menor a los valores que aparecen en la tabla 26-10, o si las concentraciones actuales del contaminante en el área, que se verán afectadas por la nueva fuente, son menores a los valores que aparecen en la tabla 26-10. EPA o el estado pueden aceptar los datos representativos del monitoreo existente, recolectados dentro de los tres años de aplicación de la licencia, para satisfacer los requerimientos de monitoreo.

Los reglamentos de EPA eximen del uso de BACT y del análisis del impacto sobre el aire ambiental a la industria cuya modificación que incremente las emisiones va acompañada de otros cambios dentro de la planta que totalicen un incremento nulo de las emisiones totales.

TABLA 26-6 Estándar de los contaminantes peligrosos del aire

Asbesto	Ausencia de emisiones visibles de la molienda, fabricación, desencofrado, rociado o colocación final del desperdicio; de otro modo, empléese un filtro de tela a la velocidad de asentamiento específico para el flujo de aire, la caída de presión y el peso, o un método equivalente de control.
Berilio	Las emisiones no deben exceder a 10 g/24 h o, con autorización del administrador, no deben exceder a una concentración ambiental de 0.01 μg, promediado en 30 días.
Mercurio	1. En las instalaciones de procesamiento de mineral de mercurio o en las plantas de cloroálcali con celda de mercurio, las emisiones no deben exceder 2300 g/24 h. 2. Las emisiones de mercurio procedentes de un incinerador y secador de sedimentos no deben exceder 3200 g/24 h.
Cloruro de vinilo	Las emisiones específicas permitidas de cloruro de vinilo (y cloruro de polivinilo) en todas las etapas de la producción de las plantas purificadoras de dicloruro de etileno, los reactores de oxiclorinación y las plantas purificadoras y formadoras de cloruro de vinilo y cloruro de polivinilo se encuentran en la sección del 40CFR.

T

P

S

TABLA 26-8 Fu potencial de em

Plantas termoeléctrica calor superior a 250
Plantas de depuración
Molinos de pulpa de p
Fábricas de cemento I
Fundidoras primarias
Laminadoras de hierr
Plantas primarias de r
Fundidoras primarias
Incineradores munici desperdicios por dí
Plantas de ácido fluor
Refinerías de petróleo
Fábricas de cal
Plantas de procesami
Bacterias de hornos d
Plantas de recuperaci
Plantas de negro de h
Fundidoras primarias
Plantas de conversión
Plantas de sinterizaci
Plantas secundarias d
Plantas de procesos q
Calderas operadas co totalicen una entra
Unidades de almacen de almacenamient
Plantas de procesami
Plantas de procesami
Plantas de producció

Esta exención se co tro neto nulo".

La revisión para una determinació BACT, un análisis si la fuente puede calidad del aire, un no y la vegetación revisión pública co

Los reglamentos cipales elementos tas fuentes de cum con NSPS y con l planes estatales de exentas de realizar la presentación de bienal; sin embarg que permanecen s

iriό que cada planta
trucción. Los regla-
rucción de una nue-
el procedimiento de
se tomen las provi-
e cualquier aspecto

rioro significativo
SD (40 CFR, Secc.
as importantes y las
de cumplimiento y
mportante se define
26-8, con un poten-
quier contaminante
ualquier otra fuente
or año de cualquier
il de emisión" se de-
ntaminante bajo las
y las condiciones de
r equipo de control
isiones secundarias.
uier cambio físico o
nte que produce un
s" de cualquier con-
6-9).

s contaminantes re-
iguales a los valores
NAAQS (salvo los
requiere para otros
el estado determina
eden eximir el moni-
CAA, si el impacto
nto de las emisiones
-10, o si las concen-
e se verán afectadas
aparecen en la tabla
representativos del
s años de aplicación
le monitoreo.

CT y del análisis del
ya modificación que
s cambios dentro de
s emisiones totales.

ntes peligrosos

de la molienda,
ciado o colocación
modo, empléese un
asentamiento
e, la caída de presión
alente de control.
r a 10 g/24 h o, con
or, no deben exceder a
le 0.01 μg, promediado

samiento de mineral de
cloroálcali con celda
o deben exceder 2300

rocedentes de un
imentos no deben

itidas de cloruro de
o) en todas las etapas
as purificadoras de
tores de oxiclorinación
formadoras de cloruro
ilo se encuentran en la

TABLA 26-7 Prevención del deterioro significativo (PSD) de la calidad del aire

	Incremento máximo permitido sobre la línea de referencia de la calidad de aire, μg/m³			Estándar primario de la calidad del aire, μg/m³
	Clase I	Clase II	Clase III	
Partículas				
Media geométrica anual	5	19	37	75
Máximo en 24 h	10	37	75	260
SO_2				
Media geométrica anual	2	20	40	80
Máximo en 24 h	5	91	182	365
Máximo en 3 h	25	512	700	1300*

*Estándar secundario en lugar del primario.

TABLA 26-8 Fuentes sujetas al reglamento PSD si su potencial de emisión iguala o excede a 100 ton por año

- Plantas termoeléctricas operadas con combustibles fósiles con una entrada de calor superior a 250 millones de Btu/h
- Plantas de depuración de carbón (con secadores térmicos)
- Molinos de pulpa de papel
- Fábricas de cemento Portland
- Fundidoras primarias de zinc
- Laminadoras de hierro y acero
- Plantas primarias de reducción de mineral de aluminio
- Fundidoras primarias de cobre
- Incineradores municipales, con una capacidad de carga de 250 ton de desperdicios por día
- Plantas de ácido fluorhídrico, nítrico y sulfúrico
- Refinerías de petróleo
- Fábricas de cal
- Plantas de procesamiento de roca fosfórica
- Baterías de hornos de coque
- Plantas de recuperación de azufre
- Plantas de negro de humo (proceso de horno)
- Fundidoras primarias de plomo
- Plantas de conversión de combustible
- Plantas de sinterización
- Plantas secundarias de producción de metales
- Plantas de procesos químicos
- Calderas operadas con combustibles fósiles (o sus combinaciones) que totalicen una entrada de calor de más de 250 millones de Btu/h
- Unidades de almacenamiento y transferencia de petróleo con una capacidad de almacenamiento total superior a 300 000 barriles
- Plantas de procesamiento de mineral de taconita
- Plantas de procesamiento de fibra de vidrio
- Plantas de producción de carbón

Esta exención se conoce como "exención de burbuja" o de "incremento neto nulo".

La revisión para la prevención de un deterioro significativo incluye una determinación caso por caso de los controles requeridos por BACT, un análisis del impacto sobre el aire ambiental para determinar si la fuente puede violar los incrementos aplicables o las normas de calidad del aire, una evaluación del efecto sobre la visibilidad, el terreno y la vegetación, la presentación de los datos del monitoreo y una revisión pública completa.

Los reglamentos de EPA eximen a las fuentes pequeñas de los principales elementos de la revisión para PSD, en particular, relevan a estas fuentes de cumplir con BACT (sin embargo, tendrán que cumplir con NSPS y con los requerimientos previstos en el programa de los planes estatales de ejecución). Las fuentes pequeñas también están exentas de realizar el análisis del impacto sobre el aire ambiental y de la presentación de datos que apoyen el análisis de calidad del aire ambiental; sin embargo, no están exentas del programa en su conjunto, ya que permanecen sujetas a los requerimientos estatutarios para obtener

TABLA 26-9 Incremento de las emisiones totales significativas

Contaminante	Ton/año
CO	100
NO_x (como NO_2)	40
SO_2	40
Partículas	25
Ozono	40 de compuestos orgánicos volátiles
Plomo	0.6
Asbesto	0.007
Berilio	0.0004
Mercurio	0.1
Cloruro de vinilo	1
Fluoruros	3
Niebla de ácido sulfúrico	7
Sulfuro de hidrógeno	10
Azufre total reducido	10
Compuestos de azufre reducido	10
Otros contaminantes de CAA	> 0

la aprobación previa a la construcción, que incluye los procedimientos para la revisión pública y, a solicitud de EPA, puede pedírseles que presenten datos en apoyo de sus aplicaciones. Además, si las emisiones de una fuente pequeña afectan un área de Clase I, o si se violara cierto incremento establecido, se aplicarán todos los requerimientos para la prevención de un deterioro significativo, para el análisis del impacto sobre el aire ambiental.

Incumplimiento (NA) Las áreas en Estados Unidos que no cumplan con las normas de calidad del aire ambiental se consideran zonas de incumplimiento y sólo se podrán construir nuevas plantas en estas zonas si cumplen condiciones estrictas. Las emisiones tienen que controlarse al máximo posible y deben obtenerse reducciones equivalentes de otras fuentes que compensen considerablemente las emisiones, para asegurar el progreso hacia el logro de los estándares. Específicamente, **1)** la nueva fuente debe equiparse con controles de contaminación, para asegurar el logro de la velocidad más baja de emisión (LAER), que en ningún caso será menos estricta que cualquiera NSPS aplicable; **2)** todas las fuentes existentes, propiedad de un solo solicitante en la misma zona deben cumplir con los requerimientos aplicables del plan estatal de ejecución, o bien encontrarse bajo un programa aprobado o una orden de observancia forzosa, para lograr el cumplimiento; **3)** el solicitante debe tener compensaciones suficientes que neutralicen considerablemente las emisiones generadas por la nueva fuente (después de la aplicación de LAER) y **4)** la compensación de las emisiones debe proporcionar "un beneficio positivo a la calidad total del aire en la zona afectada".

El logro de la velocidad más baja de emisión es una norma o estándar de control deliberada, para forzar el uso de la tecnología. El estatuto establece que LAER debe reflejar **1)** la limitación más estricta de las emisiones, contenida en el plan de puesta en práctica de cualquier es-

TABLA 26-10 Efectos de concentraciones abajo de las que puede no requerirse monitoreo

	μg/m³	Tiempo promedio
CO	575	8 h máximo
NO_2	14	24 h máximo
TSP	10	24 h máximo
SO_2	13	24 h máximo
Plomo	0.1	24 h máximo
Mercurio	0.25	24 h máximo
Berilio	0.0005	24 h máximo
Fluoruros	0.25	24 h máximo
Cloruro de vinilo	15	24 h máximo
Azufre total reducido	10	1 h máximo
H_2S	0.04	1 h máximo
Compuestos de azufre reducido	10	1 h máximo

tado, para la categoría específica de las fuentes, a menos que el solicitante pueda demostrar que dicha limitación no se puede lograr; o **2)** la limitación más estricta que se puede alcanzar en la práctica, dentro de la categoría de la industria; sea cual fuere la más estricta de las dos limitaciones antes mencionadas. En ningún caso LAER será menos riguroso que cualquiera NSPS aplicable. A pesar de que el lenguaje estatutario que define BACT indica que deben considerarse "el impacto de la energía, el medio ambiente y los aspectos económicos, así como los demás costos", la provisión comparable de LAER no menciona la consideración de los costos.

Para las fuentes existentes que emiten contaminantes en una zona de incumplimiento se requiere el empleo de una tecnología razonable y disponible de control (RACT). EPA está por definir RACT para cada categoría industrial.

Programa de industrialización controlada La legislación contenida en la Clean Air Act Amendments de 1977 proporciona las bases para el programa de industrialización controlada de EPA, cuyos elementos esenciales incluyen:

La política de burbuja (o la exención de burbuja para la prevención de deterioro significativo) La política de compensación (en zonas de incumplimiento). La política bancaria y de corretaje (en zonas de incumplimiento).

A pesar de que estas políticas varían ampliamente en la forma, su objetivo es básicamente el mismo: sustituir los sistemas flexibles de incentivos económicos por los reglamentos actuales rígidos, basados en la tecnología, que especifican exactamente la forma en que las compañías deben cumplir. Aun desde las etapas preliminares, estos mecanismos de comercialización pudieron hacer que la reglamentación fuese más fácil para EPA y menos problemática y costosa para las industrias.

Política de burbuja El concepto de burbuja introducido en las especificaciones de las Clean Air Act Amendments (Reformas a la Ley del Aire Limpio) de 1977 para prevenir un deterioro significativo fue propuesto formalmente como una política de EPA el 18 de enero de 1979; el decreto final de esta política se publicó el 11 de diciembre de 1979. La política de burbuja permite que la empresa encuentre el modo más eficiente para controlar las emisiones de la planta como un todo, en vez de cumplir con los requerimientos de los puntos individuales de la fuente. Si es más económico ejercer un control riguroso de un contaminante en un punto y relajar el control en otro, se puede hacer siempre y cuando la contaminación total producida por la planta no exceda la suma de los límites actuales de las fuentes individuales de contaminación dentro de la planta. Este método, aplicado en forma adecuada, promueve una mayor eficiencia económica e incrementa la innovación tecnológica.

Sin embargo, existen algunas restricciones para la aplicación del concepto de burbuja.

1. La política de burbuja sólo se puede utilizar para los contaminantes generados en un área donde el plan estatal de ejecución tenga un programa aprobado, para cumplir con las normas de calidad del aire, para dicho contaminante.

2. Las opciones utilizadas deben asegurar que se cumplan las normas de calidad del aire.

3. Las emisiones deben ser cuantificables y las compensaciones entre ellas deben ser equitativas. Cada punto de emisión debe tener un límite específico de emisión y dicho límite debe relacionarse con las técnicas vigentes de prueba.

4. Sólo se pueden compensar contaminantes del mismo tipo, es decir, partículas por partículas, hidrocarburos por hidrocarburos, etc.

5. El control de los contaminantes peligrosos no se puede mitigar mediante compensaciones con contaminantes menos tóxicos.

6. El desarrollo de la política de burbuja no puede retrasar la observancia forzosa de los requerimientos federales y estatales.

Deben tenerse en cuenta algunas consideraciones adicionales:

1. La política de burbuja puede cubrir más de una planta dentro de la misma área.

2. En algunos casos, los estados pueden considerar la compensación de las emisiones de polvo por las de partículas (sin embargo, EPA advierte que este tipo de compensación es difícil).

3. En casos especiales, EPA puede ampliar las fechas de cumplimiento. Por ejemplo, una fuente puede obtener un retraso en el programa de cumplimiento para instalar un depurador, si este retraso pudiera autorizarse sin la aplicación de la política de burbuja.

EPA examinará detalladamente la distribución del tamaño de las partículas en compensaciones de emisión de partículas, porque las partículas más finas se dispersan en forma más amplia y permanecen más tiempo en el aire.

La industria es responsable de sugerir métodos opcionales de control y demostrar en forma satisfactoria que la proposición es equivalente en la reducción de la contaminación, la observancia forzosa y el impacto en el medio ambiente según las normas existentes de los procesos individuales.

Políticas de compensación Las compensaciones fueron la primera aplicación de EPA relacionada con el concepto de que una fuente puede cumplir con sus obligaciones de protección al medio ambiente, al hacer que otra fuente asuma medidas adicionales de control. En zonas de incumplimiento, la contaminación generada por la proposición de una nueva fuente, incluso una que controle sus emisiones al mínimo nivel posible, agravará las violaciones existentes a los estándares de calidad del aire ambiental y causará prohibición estatutaria. La política de compensación proporciona opciones a estas nuevas fuentes; es decir, la planta puede proceder con los planes de construcción, siempre y cuando:

1. La fuente controle las emisiones hasta el nivel mínimo que se pueda lograr.

2. Otras fuentes propiedad del solicitante estén dentro de observancia forzosa o bajo un programa aprobado de cumplimiento.

3. Se logre persuadir a las fuentes existentes para que reduzcan sus emisiones en una cantidad al menos igual a la contaminación que generará la nueva fuente.

Política bancaria y de corretaje La nueva política bancaria de EPA tiene como fin proporcionar incentivos a las compañías para que encuentren más compensaciones. Con base en la política original de compensaciones, la empresa que cierra o modifica una planta puede aplicar la reducción de emisiones a la nueva construcción, en cualquier parte de la zona, pero sólo si los cambios se realizan en forma simultánea. Sin embargo, con la política bancaria, la compañía puede "depositar" la reducción para utilizarla posteriormente, o venderla. Con esta política se establece claramente que el aire limpio (o el derecho a su uso) tiene un valor económico directo.

MÉTODO PARA UNA ESTRATEGIA SOBRE EL PROBLEMA DEL CONTROL DE LA FUENTE

Estrategia La tecnología de control se anula a sí misma si genera efectos colaterales indeseables en el cumplimiento de los objetivos. El control de la contaminación del aire debe considerarse en términos de los sistemas tecnológ
cuencias ecológicas
y eliminación o coloc

A menudo, la estrat
sobre el medio ambie
a la reducción y/o elin

1. Eliminación d
2. Modificación
3. Reubicación d
4. Aplicación de
5. Combinacion

En vista de los cos
relacionados con los
genieros realizan es
ción de los procesos
ma de contaminación
opcionales de produ
primas y el mejoran
desgracia, si no hay
control de contamin
dos, es esencial una
birse para cumplir c
ma continua, ya que
que dependen de las
que funcione en bas
ticas de operación y
energía, mano de o
operación y manten
pital original.

Factores que af
de seleccionar una
minación del aire es
ral se pueden agru
ambiente, la ingeni

Factores relacio
ubicación del equip
les, **4)** disponibilid
agua, etc.) e instala
y eliminación de de
gos de contaminac
pluma de vapor y a
tema de control de
de desperdicio y al
contaminación del

Factores relacio

1. Característi
cas y químicas, co
partículas (en caso
abrasividad, toxici

TABLA 26-11
recolectores ti

Ventajas

1. Bajo costo de
2. Equipo relativ
3. Caídas de pre
   partículas obte
   agua
4. Limitaciones
   materiales de
5. Recolección y
6. Requerimient

Desventajas

1. Eficiencia de
   de aquellas cu
2. Incapacidad p

e cumplan las nor-

ompensaciones en-
isión debe tener un
elacionarse con las

l mismo tipo, es de-
drocarburos, etc.
no se puede mitigar
nos tóxicos.
de retrasar la obser-
statales.
es adicionales:
una planta dentro de

ar la compensación
n embargo, EPA ad-

s fechas de cumpli-
retraso en el progra-
este retraso pudiera
uja.
l del tamaño de las
ulas, porque las par-
a y permanecen más

opcionales de con-
posición es equiva-
rvancia forzosa y el
xistentes de los pro-

nes fueron la prime-
o de que una fuente
al medio ambiente,
es de control. En zo-
a por la proposición
misiones al mínimo
a los estándares de
statutaria. La políti-
s nuevas fuentes; es
nstrucción, siempre

ivel mínimo que se

dentro de observan-
limiento.
ra que reduzcan sus
ntaminación que ge-

política bancaria de
compañías para que
política original de
ca una planta puede
ucción, en cualquier
n en forma simultá-
pañía puede "depo-
o venderla. Con esta
o (o el derecho a su

E EL
TE

a sí misma si genera
o de los objetivos. El
rarse en términos de

los sistemas tecnológicos totales (equipo y procesos) y de las consecuencias ecológicas como, por ejemplo, los problemas de tratamiento y eliminación o colocación final de los contaminantes recolectados.

A menudo, la estrategia de control para la determinación del impacto sobre el medio ambiente se enfoca con base en cinco opciones destinadas a la reducción y/o eliminación de las emisiones de contaminantes:

1. Eliminación de toda o parte de la operación
2. Modificación de la operación
3. Reubicación de la operación
4. Aplicación de la tecnología adecuada de control
5. Combinaciones de los puntos anteriores

En vista de los costos relativamente elevados que, a menudo, están relacionados con los sistemas de control de la contaminación, los ingenieros realizan esfuerzos considerables, destinados a la modificación de los procesos para eliminar, hasta donde sea posible, el problema de contaminación de la fuente. Esto incluye la evaluación de técnicas opcionales de producción y manufactura, la sustitución de materias primas y el mejoramiento de los métodos de control del proceso. Por desgracia, si no hay opción, debe considerarse el empleo de equipo de control de contaminación. En vista de los costos relativamente elevados, es esencial una selección adecuada del equipo, que debe concebirse para cumplir con los límites reglamentarios de emisiones en forma continua, ya que las interrupciones están sujetas a penas severas, que dependen de las circunstancias. El requerimiento para un diseño que funcione en base continua recalca considerablemente en las prácticas de operación y mantenimiento. La rápida escalada de costos de energía, mano de obra y materiales puede hacer que los aspectos de operación y mantenimiento sean más importantes que el costo de capital original.

Factores que afectan la selección del equipo de control Antes de seleccionar una pieza determinada del equipo de control de contaminación del aire es necesario considerar varios factores, que en general se pueden agrupar en tres categorías, relacionadas con el medio ambiente, la ingeniería y los costos.

Factores relacionados con el medio ambiente Éstos incluyen: **1)** ubicación del equipo, **2)** espacio disponible, **3)** condiciones ambientales, **4)** disponibilidad de los servicios adecuados (es decir, energía, agua, etc.) e instalaciones de sistemas auxiliares (es decir, tratamiento y eliminación de desechos, etc.), **5)** emisión máxima permitida (códigos de contaminación del aire), **6)** consideraciones estéticas (p. ej., pluma de vapor y agua o vapor visible, etc.), **7)** contribuciones del sistema de control de contaminación del aire a la contaminación del agua de desperdicio y al terreno, y **8)** contribución del sistema de control de contaminación del aire a los niveles de ruido de la planta.

Factores relacionados con la ingeniería Éstos incluyen:

1. Características de los contaminantes [es decir, propiedades físicas y químicas, concentración, distribución de forma y tamaño de las partículas (en caso de partículas), reactividad química, corrosividad, abrasividad, toxicidad, etc.]

TABLA 26-11 Ventajas y desventajas de los recolectores tipo ciclón

Ventajas

1. Bajo costo de construcción
2. Equipo relativamente sencillo con pocos problemas de mantenimiento
3. Caídas de presión relativamente bajas (para el nivel de eliminación de partículas obtenido) en el intervalo aproximado de 2 a 6 in de columna de agua
4. Limitaciones de temperatura y presión impuestas exclusivamente por los materiales de construcción utilizados
5. Recolección y colocación final en seco
6. Requerimientos de espacio relativamente pequeños

Desventajas

1. Eficiencia de recolección de partículas relativamente baja, especialmente de aquellas cuyo diámetro es menor a 10 μm
2. Incapacidad para manejar materiales pegajosos

TABLA 26-12 Ventajas y desventajas de los depuradores en húmedo

Ventajas

1. No son fuentes secundarias de polvo
2. Requerimientos de espacio relativamente pequeños
3. Capacidad para recolectar gases y partículas (especialmente las pegajosas)
4. Capacidad para manejar corrientes de gas a altas temperaturas y con alto contenido de humedad
5. Bajo costo de capital (si no se requiere sistema de tratamiento del agua de desperdicio)
6. Para algunos procesos, la corriente de gas ya está a alta presión (por consiguiente, las consideraciones de caída de presión pueden no ser importantes)
7. Capacidad para lograr alta eficiencia de recolección de partículas finas (sin embargo, a expensas de la caída de presión)

Desventajas

1. Probable generación de problemas de colocación final del agua
2. Producto recolectado en húmedo
3. Problemas de corrosión más graves que con los sistemas secos
4. Opacidad de la pluma de vapor y/o arrastre de gotas que pueden ser objetables
5. La caída de presión y los requerimientos de potencia pueden ser elevados
6. La acumulación de sólidos en la interfase húmeda-seca puede ser un problema
7. Costos de mantenimiento relativamente altos

TABLA 26-13 Ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos

Ventajas

1. Eficiencia muy alta de recolección de partículas (gruesas y finas), lograda con un gasto relativamente bajo de energía
2. Recolección y colocación final en seco
3. Baja caída de presión (característicamente menor a 0.5 in de columna de agua)
4. Diseñados para operación continua, con requerimientos mínimos de mantenimiento
5. Costo de operación relativamente bajo
6. Capacidad para operar a altas presiones (hasta 150 lbf/in^2) o al vacío
7. Capacidad para operar a altas temperaturas [hasta 704°C (1300°F)]
8. Capacidad para manejar en forma eficiente velocidades de flujo de gas relativamente altas

Desventajas

1. Alto costo de capital
2. Muy sensibles a cambios en las condiciones de la corriente gaseosa (en especial, el flujo, la temperatura, la composición del gas y las partículas y la carga de partículas)
3. Ciertas partículas son difíciles de recolectar, debido a características de resistividad relativamente altas o bajas
4. Se requieren espacios relativamente grandes para su instalación
5. Riesgo de explosión al recolectar partículas combustibles o tratar gases combustibles
6. Se requieren medidas especiales de seguridad para proteger al personal del alto voltaje
7. Durante la ionización del gas se produce ozono, por la descarga del electrodo cargado negativamente
8. Se requiere personal de mantenimiento altamente capacitado

2. Características de la corriente gaseosa (o sea, velocidad de flujo volumétrico, temperatura, presión, humedad, composición, viscosidad, densidad, reactividad, inflamabilidad, corrosividad, toxicidad, etc.)

3. Características de diseño y funcionamiento del sistema de control de partículas [p. ej., peso y tamaño, curvas de porcentaje de eficiencia (en el caso de partículas), capacidad de transferencia de masa y/o destrucción del contaminante (en el caso de gases o vapores), caída de presión, confiabilidad, capacidad de reducción (p. ej., requerimientos de potencia y de servicios, límites de temperatura, necesidades de mantenimiento y flexibilidad para cumplir con los códigos más rigurosos de contaminación del aire].

Factores económicos Éstos incluyen: los costos de capital (equipo, instalación, ingeniería, etc.), los costos de operación (servicios,

mantenimiento, etc.) y el costo del ciclo de vida, durante la vida útil esperada del equipo.

Comparación de opciones para el equipo de control Por lo general, la opción final en la selección del equipo está determinada por la capacidad de éste para cumplir con los códigos reglamentarios al costo uniforme anual más bajo (inversión del capital amortizado más costos de operación y mantenimiento). Para comparar las opciones específicas del equipo de control es necesario conocer la aplicación y el sitio particulares. Sin embargo, se puede realizar una selección preliminar, mediante la revisión de las ventajas y desventajas de cada tipo de equipo de control de contaminación del aire. En las tablas 26-11 a 26-19 aparecen las ventajas y desventajas generales de los equipos más comunes para el control de la contaminación del aire, para gases y partículas. En la tabla 26-20 se muestran otras actividades a realizar, antes de la selección final.

DISPERSIÓN DE LAS CHIMENEAS

Las chimeneas que descargan a la atmósfera ha sido el método industrial más común para deshacerse de los gases de desperdicio. La concentración a la que se ven expuestos los seres humanos, animales, plantas y estructuras al nivel del terreno se puede reducir considerablemente mediante la emisión a gran altura de los gases de desperdicio del proceso. A pesar de que las chimeneas altas pueden reducir la concentración de contaminantes al nivel del terreno, no pueden reducir por sí mismas la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera. Sin embargo, en ciertos casos, su utilización puede ser el método más práctico y económico para tratar un problema de contaminación del aire.

Consideraciones preliminares de diseño Para determinar lo adecuado de una chimenea como medio para deshacerse de los gases de desperdicio, es necesario determinar la concentración aceptable a

TABLA 26-14 Ventajas y desventajas de los sistemas de filtros de bolsas

Ventajas

1. Eficiencia muy alta de recolección de partículas gruesas y finas (submicrónicas)
2. Relativamente insensible a las variaciones en la corriente de gas; la eficiencia y la caída de presión casi no se ven afectadas por cambios grandes, en la carga de entrada de polvo, para filtros que se limpian continuamente
3. En muchos casos, el aire de salida del filtro se puede recircular a la planta (para conservación de energía)
4. El material recolectado se recupera seco, para su posterior procesamiento o colocación final
5. No se tienen problemas de colocación final del líquido de desecho, la contaminación del agua o la congelación del líquido
6. Por lo general, la corrosión y oxidación de las partes no es problema
7. No hay riesgo de alto voltaje, el mantenimiento y las reparaciones son sencillas y permiten la recolección de polvos inflamables
8. El empleo de ayudafiltros fibrosos o granulares (precapa) permite una alta eficiencia de recolección de humos y contaminantes gaseosos submicrónicos
9. Se dispone de filtros de bolsas en muchas configuraciones, lo que da por resultado una gran variedad de dimensiones de las bridas de entrada y salida, para adecuarse a los requerimientos de la instalación
10. Operación relativamente sencilla

Desventajas

1. Las temperaturas que exceden a 288°C (550°F) requieren material refractario especial o telas metálicas que aún están en etapa de desarrollo y pueden ser costosas
2. Ciertos polvos requieren posiblemente telas tratadas para reducir la filtración del polvo o, en otros casos, ayudar a la eliminación del polvo recolectado
3. Las concentraciones de algunos polvos en el recolector (~ 50 g/m^3) constituyen un riesgo de incendio o explosión si penetran chispas o llamas por accidente; existe la posibilidad de quemar las telas si se recolectan polvos fácilmente oxidables
4. Requerimientos de mantenimiento relativamente altos (reemplazo de las bolsas, etc.)
5. A temperaturas elevadas se puede acortar la vida de la tela, así como en presencia de partículas ácidas o alcalinas y componentes gaseosos
6. Los materiales higroscópicos, la condensación de humedad y los componentes alquitranados adhesivos pueden causar el taponamiento o agrietamiento de la tela, o bien requerir aditivos especiales
7. El reemplazo de las telas puede requerir protección respiratoria para el personal de mantenimiento
8. Requerimientos intermedios de caída de presión, característicamente del orden de 4-10 in de columna de agua

TABLA 26-15 Ventajas y desventajas de los sistemas de absorción (columnas de platos y empacadas)

Ventajas

1. Caída de presión relativamente baja
2. Normalización en la construcción a base de plástico reforzado con fibra de vidrio, lo que permite la operación en atmósferas altamente corrosivas
3. Capacidad para lograr eficiencias de transferencia de masa relativamente altas
4. El incremento de la altura y/o el tipo de empaque o el número de platos puede mejorar la transferencia de masa sin necesidad de comprar otro equipo
5. Costo de capital relativamente bajo
6. Requerimientos de espacio relativamente pequeños
7. Capacidad para recolectar partículas y gases

Desventajas

1. Pueden crear problemas para la colocación final del agua (o del líquido)
2. El producto se recolecta húmedo
3. La deposición de las partículas puede causar el taponamiento del lecho o de las placas
4. Cuando se utiliza la construcción de plástico reforzado con fibra de vidrio, son sensibles a la temperatura
5. Costos de mantenimiento relativamente altos

TABLA 26-16 Comparación de las columnas empacadas y de platos

Columnas empacadas

1. Menor caída de presión
2. Su construcción es más sencilla y económica
3. Preferibles para líquidos con alta tendencia a la formación de espuma

Columnas de platos

1. Menos susceptibles al taponamiento
2. Menor peso
3. Menos problemas de acanalamientos
4. Las variaciones de temperatura dan por resultado menor daño

TABLA 26-17 Ventajas y desventajas de los sistemas de adsorción

Ventajas

1. Se puede recuperar el producto
2. Magnífico control y respuesta a los cambios del proceso
3. No existe problema de la colocación final del producto químico, cuando el contaminante (producto) se recupera y se devuelve al proceso
4. Capacidad de utilizar sistemas totalmente automáticos y operar sin personal
5. Capacidad de eliminación de los contaminantes gaseosos o en forma de vapor de las corrientes del proceso hasta niveles extremadamente bajos

Desventajas

1. La posible recuperación del producto requiere un sistema de destilación (o extracción) costoso y poco usual
2. Se deteriora progresivamente la capacidad del adsorbente a medida que se incrementa el número de ciclos
3. La regeneración del adsorbente requiere una fuente de vapor o vacío
4. Costo de capital relativamente elevado
5. Puede requerirse el prefiltrado de la corriente gaseosa para eliminar cualquier partícula que pueda tapar el lecho del adsorbente
6. Puede requerirse el enfriamiento de la corriente de gas para llegar al intervalo usual de operación [menos de 49°C (120°F)]
7. Requerimientos relativamente elevados de vapor para desorber los hidrocarburos de alto peso molecular

TABLA 26-18 V
de combustión

Ventajas

1. Sencillez de ope
2. Capacidad para g
3. Capacidad para d

Desventajas

1. Costos de operac
dos con el combu
2. Posibilidad de re
3. Envenenamiento
4. La combustión p
nación

TABLA 26-19 V
condensadores

Ventajas

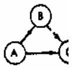
1. Recuperación de
indirecto)
2. El agua utilizad
tacto indirecto (
no está en cont
volverse a utiliz

Desventajas

1. Eficiencia de eli
gaseosos (a las
control de la co
2. Los requerimien

nivel del terreno (G
derarse la topografí
en forma adecuada
introducir un facto
nea (véase la Fig. 2
meteorológicas qu

TABLA 2



1. Fecha
2. Fecha
3. Fecha
4. Fecha
5. Fecha

Designac
A-C
A-B
C-D
D-E
E-F
F-G
G-1
I-H
H-J
J-2
2-K

s pueden reducir la
, no pueden reducir
s a la atmósfera. Sin
nétodo más práctico
ión del aire.
'ara determinar lo
acerse de los gases
tración aceptable a

los sistemas
cadas)

reforzado con fibra de
nente corrosivas
e masa relativamente

el número de platos
dad de comprar otro

agua (o del líquido)

mamiento del lecho o

do con fibra de vidrio.

inas

nación de espuma

enor daño

los sistemas

ceso
cto químico, cuando
e al proceso
y operar sin personal
eosos o en forma de
remadamente bajos

stema de destilación

rbente a medida que

de vapor o vacío

a para eliminar cual-
nte
s para llegar al inter-

a desorber los hidro-

TABLA 26-18 Ventajas y desventajas de los sistemas de combustión

Ventajas

1. Sencillez de operación
2. Capacidad para generar vapor o recuperar calor en otras formas
3. Capacidad para destruir completamente los contaminantes orgánicos

Desventajas

1. Costos de operación relativamente elevados (en especial, los relacionados con el combustible)
2. Posibilidad de retroinflamación con el subsecuente riesgo de explosión
3. Envenenamiento del catalizador (en el caso de incineradores catalíticos)
4. La combustión puede ser incompleta y crear más problemas de contaminación

TABLA 26-19 Ventajas y desventajas de los condensadores

Ventajas

1. Recuperación del producto puro (en el caso de condensadores de contacto indirecto)
2. El agua utilizada como medio de enfriamiento en un condensador de contacto indirecto (es decir, un intercambiador de calor de cubierta y tubos) no está en contacto con el gas contaminado y, en consecuencia, puede volverse a utilizar después del enfriamiento.

Desventajas

1. Eficiencia de eliminación relativamente baja en el caso de contaminantes gaseosos (a las concentraciones características en las aplicaciones para el control de la contaminación)
2. Los requerimientos de enfriamiento pueden ser extremadamente costosos

nivel del terreno (GLC) del o los contaminantes. También debe considerarse la topografía de la zona, para que la chimenea pueda colocarse en forma adecuada en relación con los edificios o colinas que pudieran introducir un factor de turbulencia del aire en la operación de la chimenea (véase la Fig. 26-1). Otro aspecto importante son las condiciones meteorológicas que prevalecen en el área como, por ejemplo, vientos dominantes, humedad y lluvia. Por último, otro factor determinante es el conocimiento de los constituyentes del gas de desperdicio y sus propiedades físicas y químicas.

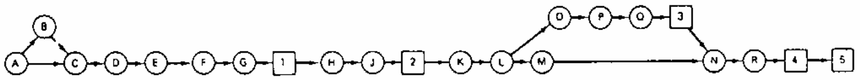
Dirección y velocidad del viento La dirección del viento se determina a la altura a que es liberado el contaminante y la dirección media indica el desplazamiento de los contaminantes. En meteorología se acostumbra considerar la dirección del viento como aquella desde la que sopla el viento; por consiguiente, un viento del noroeste desplazará los contaminantes hacia el sureste de la fuente.

El efecto de la velocidad del viento tiene dos aspectos: **1)** la velocidad del viento determina el tiempo de desplazamiento de la fuente hacia un receptor dado y **2)** la velocidad del viento afecta la dilución en la dirección contraria al viento. Por lo general, la concentración de los contaminantes del aire en el viento que se aleja de la fuente es inversamente proporcional a la velocidad del viento.

La velocidad del viento tiene componentes de velocidad en todas direcciones, de tal manera que existen movimientos verticales y horizontales. Estos movimientos al azar, con escalas y periodos muy diferentes, son básicamente responsables del movimiento y difusión de los contaminantes en la trayectoria media del viento que se aleja de la fuente. Estos movimientos se pueden considerar como turbulencias atmosféricas. Si la escala de un movimiento turbulento, es decir, si las dimensiones de un remolino son mayores que las de la pluma del contaminante en su proximidad, el remolino moverá dicha parte de la pluma. Si el remolino es menor que la pluma, su efecto consiste en difundir o diseminar la pluma. Esta difusión causada por el remolino en la atmósfera es muy variable pero, incluso, cuando el efecto de esta difusión es mínimo, tiene un orden de magnitud tres veces mayor a la difusión producida exclusivamente por la acción molecular.

La turbulencia mecánica es la estructura que induce un remolino en la atmósfera, debido a la rugosidad de las superficies sobre las que pasa el aire. Por lo tanto, la existencia de árboles, arbustos, edificios y la configuración del terreno causarán turbulencia mecánica. La altura y espaciamiento de los elementos que son causa de la rugosidad afecta la turbulencia. En general, cuanto más altos son los elementos de rugosidad, mayor será la turbulencia mecánica. Además, esta turbulencia se incrementa en forma proporcional con la velocidad del viento.

TABLA 26-20 Actividades de acatamiento y diagrama del programa



☐ Acontecimiento importante

Acontecimiento importante

1. Fecha de entrega del plan final de control a la agencia adecuada
2. Fecha de otorgamiento del contrato del dispositivo de control
3. Fecha de iniciación de la construcción o instalación en la planta del equipo de control de emisiones
4. Fecha en que termina la construcción o instalación en la planta del equipo de control de emisiones
5. Fecha en la que se logra el acatamiento final

Actividades

Designación	Actividad	Designación	Actividad
A-C	Investigación preliminar	K-L	Revisión y aprobación de los planos del montaje
A-B	Pruebas de la fuente, si son necesarias	L-M	El vendedor prepara los planos de fabricación
C-D	Evaluación de las opciones de control	M-N	Fabricación del dispositivo de control
D-E	Entrega de fondos para el programa total	L-O	Preparación de los planos de ingeniería
E-F	Preparación del plan preliminar de control y el programa de acatamiento para la agencia	O-P	Solicitud de las cotizaciones de construcción
		P-Q	Evaluación de las cotizaciones de construcción
F-G	Revisión y aprobación por parte de la agencia	Q-3	Otorgamiento del contrato de construcción
G-1	Finalización de los planes y especificaciones	3-N	Construcción en el sitio
1-H	Solicitud de las cotizaciones del dispositivo de control	N-R	Instalación del dispositivo de control
H-J	Evaluación de las cotizaciones del dispositivo de control	R-4	Fin de la construcción (conexión del sistema)
J-2	Otorgamiento del contrato para el dispositivo de control	4-5	Arranque, sacudimiento, prueba de la fuente
2-K	El vendedor prepara los planos del montaje		

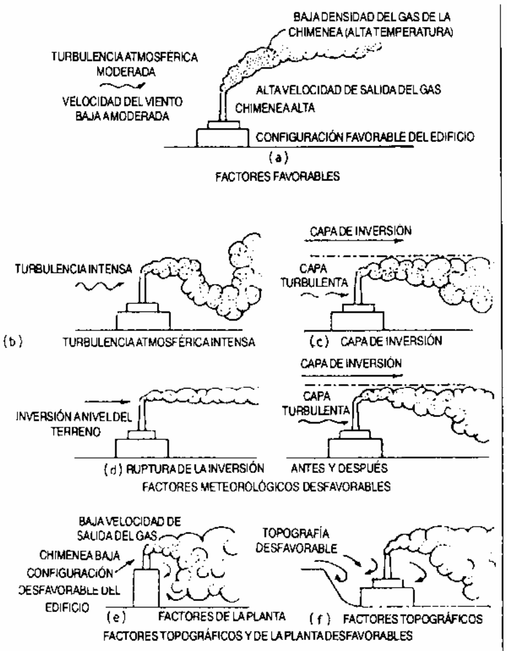


FIG. 26-1 Aspectos favorables y desfavorables de los factores importantes relacionados con la contaminación del aire por las chimeneas.

La estabilidad de la atmósfera induce la turbulencia térmica. Cuando la superficie terrestre se calienta por la radiación solar, la capa inferior de la atmósfera tiende a elevarse y se incrementa la turbulencia térmica, especialmente en condiciones de poco viento. En noches claras con viento, la superficie de la tierra irradia calor, lo que da por resultado el enfriamiento del terreno y el aire cercano que, a su vez, produce una gran estabilidad de la atmósfera adyacente a la superficie terrestre. En estas condiciones, la turbulencia es mínima.

Durante algún tiempo se han intentado relacionar las diferentes mediciones de la turbulencia del viento (o estabilidad de la atmósfera) con la difusión de la atmósfera. A menudo se utilizan las medidas de la estabilidad atmosférica, obtenidas mediante el estudio de las diferencias de temperatura en una torre, como una medida indirecta de la turbulencia, en especial cuando se desean estimaciones climáticas de la turbulencia.

Velocidad de caída y estabilidad atmosférica Aparte de la interferencia mecánica con el flujo continuo de aire, causada por los edificios y otros obstáculos, el factor más importante que afecta el grado de turbulencia y, por consiguiente, la velocidad de difusión en el aire cercano a la superficie terrestre, es la variación de temperatura respecto a la altura sobre el nivel del terreno, factor que se conoce como "velocidad de caída". La velocidad de caída en condiciones adiabáticas y secas (DALR) es el cambio de temperatura para una porción de aire seco que se eleva. Esta velocidad se puede calcular como −1°C por 100 m, o $dT/dz = -10^{-2}$ °C/m o −5.4°F/1000 ft. Si el aire ascendente contiene vapor de agua, el enfriamiento debido a la expansión adiabática dará por resultado un incremento en la humedad relativa y puede llegarse a la saturación. Si el aire sigue subiendo, se producirá la condensación del vapor de agua y el calor latente liberado reducirá la velocidad de enfriamiento del aire que se eleva. La fuerza de ascención de una porción de aire caliente es resultado de la diferencia que existe entre su

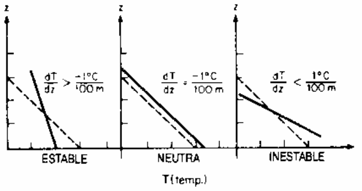


FIG. 26-2 Criterios de estabilidad con la velocidad de caída medida.

densidad y la del aire circundante. La ley de los gases ideales demuestra que, a presión constante (altitud), la temperatura y densidad de una porción de aire se encuentran inversamente relacionadas; por lo general, se utiliza la temperatura para determinar la fuerza de ascención, porque es más fácil de medir que la densidad. Si el gradiente de temperatura (velocidad de caída) de la atmósfera es igual a la velocidad adiabática de caída, la porción de aire desplazada de su posición original se dilatará o contraerá, de tal manera que su densidad y temperatura sean iguales a las del aire circundante. En este caso, no habrá fuerzas ascendentes que actúen sobre la porción desplazada y la atmósfera se conoce como "neutralmente estable".

Si, al incrementarse la altitud, la temperatura de la atmósfera disminuye más rápidamente que la velocidad adiabática de caída (sobreadiabática), la porción de aire desplazada hacia arriba tendrá una temperatura mayor que la del aire circundante. Su densidad será menor y el resultado será una fuerza neta de ascención. La situación opuesta se presenta si la porción de aire se desplaza hacia abajo y se ve sujeta a una fuerza descendente. Una vez que la porción de aire se empieza a mover hacia arriba o hacia abajo, continuará su curso y producirá condiciones atmosféricas inestables. Si, al incrementarse la altitud, la temperatura disminuye más lentamente que la velocidad adiabática de caída, la porción desplazada de aire se ve sujeta a una fuerza neta de restauración, que causa condiciones atmosféricas estables (véase la Fig. 26-2).

Las velocidades de caída intensamente estables se conocen comúnmente como "inversiones". Una gran estabilidad impide la mezcla a través de la capa de inversión. Por lo general, estas condiciones de gran estabilidad se extienden en forma vertical, pero sólo unos cientos de metros. La extensión vertical de la inversión se llama "profundidad de la inversión" y se observan dos tipos distintos: la **inversión a nivel del terreno**, causada por el enfriamiento por radiación de la superficie terrestre durante la noche y la **inversión a gran altura** que ocurre entre 500 y varios miles de metros sobre el nivel del terreno (véase la Fig. 26-3).

En la figura 26-4 aparecen algunos de los perfiles más comunes de las velocidades de caída, con sus efectos correspondientes sobre la pluma de las chimeneas.

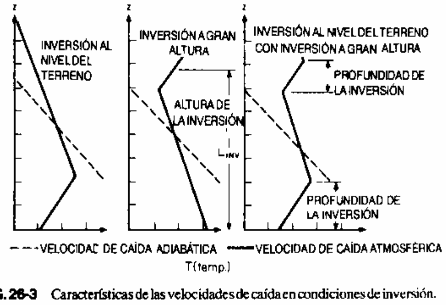
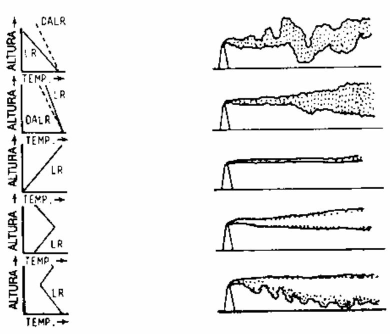


FIG. 26-3 Características de las velocidades de caída en condiciones de inversión.

Gradiente de temperatura | Observación | Descripción



Caída fuerte —en forma de circuito (inestable)
Por lo general, es de día y con buen tiempo, dado que se requiere un calentamiento solar fuerte del terreno. Al circuito no lo favorecen las nubes, la nieve o los vientos fuertes.

Caída débil —en forma de cono (ligeramente inestable o neutra)
Por lo general, favorecida por las nubes y el viento, y puede ocurrir de día o de noche. En climas secos ocurre con poca frecuencia, y en climas nublados es el tipo que se observa con más frecuencia.

Inversión --ventilación (estable)
Esto se observa principalmente por la noche y se ve favorecida por vientos ligeros, cielo claro y nieve. En algunos climas, esta condición puede persistir durante varios días, en invierno, especialmente a latitudes elevadas.

Inversión abajo, caída a gran altura —levantamiento (transición de inestable a estable)
Esta condición ocurre durante la transición de la caída a la inversión y se observa con más frecuencia cuando se pone el Sol; puede ser transitoria o persistir durante varias horas. La zona sombreada de alta concentración del efluente es causada por el atrapamiento, debido a la inversión del efluente llevado a una capa estable por los remolinos turbulentos, que penetran la capa una distancia corta.

Caída hacia abajo, inversión a gran altura —fumigación (transición de estable a inestable)
Esto ocurre cuando la inversión nocturna es disipada por el Sol de la mañana. Por lo general, la capa de caída comienza a nivel del terreno y se eleva (con menos rapidez en invierno que en verano). La fumigación puede ocurrir con la circulación de la brisa del mar, al mediodía o al iniciarse la tarde. La zona sombreada de alta concentración es la porción de la pluma que aún no se ha mezclado hacia abajo.

FIG. 26-4 Características de las velocidades de caída del transporte por difusión atmosférica de las emisiones de la chimenea.

Desde el punto de vista de la contaminación del aire, tanto la inversión de las capas superficiales estables como la de bajo nivel son indeseables, porque reducen al mínimo la velocidad de disolución de los contaminantes en la atmósfera. A pesar de que la capa superficial sea inestable, una inversión de bajo nivel actuará como una barrera al mezclado vertical y los contaminantes se acumularán en la capa superficial, abajo de la inversión. En otoño, las condiciones atmosféricas estables tienden a ser más frecuentes y durar más, pero las inversiones y las velocidades estables de caída prevalecen en todas las estaciones del año.

Cálculos de diseño Para una altura determinada de la chimenea, la secuencia de cálculo se inicia, en primer lugar, por la estimación de la altura "eficaz" de la emisión, mediante una ecuación aplicable de elevación de la pluma. Después se determina la concentración máxima aceptable a nivel del terreno, por medio de la ecuación apropiada de difusión atmosférica. La comparación de la GLC máxima calculada para el contaminante gaseoso en particular con la GLC máxima permitida por los códigos locales de contaminación del aire indica si la chimenea opera en forma satisfactoria. Por el contrario, al conocer las normas relacionadas con la concentración máxima aceptable al nivel del terreno se puede diseñar una chimenea que satisfaga estas normas.

Altura eficaz de la emisión En raras ocasiones, la altura eficaz de una emisión corresponde a la altura física de la chimenea. Si la pluma se ve atrapada en la turbulencia producida por la chimenea o los edificios cercanos a ella, el efluente se mezclará rápidamente y descenderá a la superficie del terreno. Si la pluma se emite libremente, sin interferencia de estas zonas de turbulencia, varios factores de emisión y meteorológicos afectarán la elevación de la pluma. Los factores de emisión incluyen la velocidad de flujo del gas y la temperatura del efluente en la parte superior de la chimenea, así como el diámetro de la abertura de la chimenea. Los factores meteorológicos que afectan la elevación de la pluma incluyen la velocidad del viento, la temperatura del aire, el esfuerzo cortante de la velocidad del viento respecto a la altura y la estabilidad atmosférica. Hasta la fecha, en ninguna teoría sobre la elevación de la pluma se consideran todas estas variables. La mayor parte de las ecuaciones formuladas para el cálculo de la altura eficaz de la emisión son semiempíricas. Al considerar cualquiera de estas ecuaciones de elevación de la pluma es importante evaluarlas en términos de las suposiciones realizadas y las circunstancias existentes en el momento en que se formuló la correlación particular. Por lo general, las ecuaciones no se aplican a chimeneas altas [con una altura eficaz superior a 305 m (1000 ft)].

La altura eficaz de la chimenea (equivalente a la altura eficaz de la emisión) es la suma de la altura real de la chimenea, la elevación de la pluma, debida a la velocidad de salida (momentum) de los gases y la fuerza de ascensión, que depende de la temperatura de los gases emitidos y las condiciones atmosféricas.

Algunas de las ecuaciones más comunes para el cálculo de la elevación de la pluma fueron resumidas por Buonicore y Theodore (*Industrial Control Equipment for Gaseous Pollutants*, vol. II, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1975) e incluyen:

- ASME (*Recomended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effuents*, ASME, New York, 1968)
- Bosanquet-Carcy-Halton [*Proc. Inst. Mech. Eng. (London)*, **162**, 355 (1950)]
- Briggs (*Plume Rise*, AEC Critical Review ser., U.S. Atomic Energy Commission, Div. Tech, Inf.)
- Carson y Moses [*J. Air Pollut. Control Assoc.*, **18**, 454 (1968), y **19**, 862 (1969)]
- CONCAWE (Brummage et al., *The Calculation of Atmospheric Dispersion from a Stak*, CONCAWE, The Hague, 1966)
- Csanady [*Int. J. Air Water Pollut.*, **4**, 47 (1961)]
- Davison-Bryant (*Trans. Conf. Ind. Wastes*, 14th Ann. Meet. Ind. Hyg. Found. Am., **39**, 1949)
- Holland (*Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, U.S. EPA Publ. AP-26, 1970)
- Lucas, Moore y Spurr [*Int. J. Air Water Pollut.*, **7**, 473 (1963)]
- Stone y Clarke (*British Experience with Tall Stacks for Air Pollution Control on Large Fossil-Fueled Power Plants*, American Power Conference, Chicago, 1967)
- Stumke [*Staub*, **23**, 549 (1963)]
- TVA [Montgomery et al., *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **22** (10), 779 (1972)]

Concentración máxima a nivel del terreno Una vez determinada la altura eficaz de la emisión, el siguiente paso consiste en analizar su trayectoria descendente, por medio de la ecuación adecuada de dispersión atmosférica. Buonicore y Theodore (*op. cit.*) también han resumido algunos de los procedimientos de cálculo más comunes para la dispersión atmosférica e incluyen:

- Bosanquet-Pearson model [*Trans. Faraday Soc.*, **32**, 1249 (1936)]
- Pasquill-Gifford model [Pasquill, *Meteorol. Mag.*, **90**, 33, 1063 (1961), y Gifford, *Nucl. Saf.*, **2**, 4, 47 (1961)]
- Sutton model [*Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **73**, 257 (1947)]
- TVA model [Carpenter et al., *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **21** (8) (1971) y Montgomery et al., *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **23** (5), 388 (1973)]

Efectos diversos

Enfriamientos por evaporación Cuando se lavan los gases de salida para absorber algunos constituyentes antes de la emisión, los gases se enfrían y se saturan con vapor de agua. Al dejar salir los gases puede presentarse un enfriamieto adicional, producto del contacto con las superficies frías de los ductos o la chimenea. Este enfriamiento origina la condensación de gotitas de agua en la corriente gaseosa. Cuando los gases salen por la chimenea, las gotas de agua se evaporan, extrayendo del aire el calor latente de evaporación y enfriando la pluma. La fuerza descendente que resulta disminuye la altura eficaz de la chimenea y el resultado puede ser una pluma (con densidad mayor a la del aire ambiente) que cae a la superficie del terreno. Si después del lavado aún permanece cualquiera de los contaminantes, su efecto se sentirá en el terreno cercano a la chimenea.

Lavado descendente aerodinámico Si la velocidad de salida de la chimenea es demasiado baja en comparación con la velocidad del viento transversal, parte del efluente puede ser arrastrado hacia abajo, por la baja presión en el lado de la chimenea contrario al viento. Este fenómeno, conocido como "lavado descendente", se puede reducir al mínimo al mantener una velocidad de salida mayor a la velocidad media del viento; es decir, en forma característica, el doble de la velocidad media del viento. Otro método para reducir al mínimo el lavado descendente consiste en equipar la parte superior de la chimenea con un disco plano que se extienda, al menos, una distancia igual al diámetro de la chimenea y hacia fuera de ésta.

Si, para evitar el lavado descendente, es necesario incrementar la velocidad de salida de los gases de la chimenea, quizá se requiera remodelar la salida. Se ha descubierto que el diseño más eficaz es la tobera tipo Venturi, que también mantiene a un nivel mínimo las pérdidas por fricción.

Chimeneas múltiples En el pasado, el efecto de las fuentes con chimeneas múltiples se manejó considerando cada una como una fuente distinta y sumando las concentraciones resultantes, para obtener la concentración total. Sin embargo, en la actualidad se dispone de un método mejorado para estimar el efecto de las fuentes múltiples [Montgomery, *J. Air Pollut. Control Assoc.* **23** (5), 388 (1973)].

CONTROL DE LA FUENTE DE EMISIONES GASEOSAS

Existen cuatro operaciones unitarias de la ingeniería química que comúnmente se utilizan para el control de las emisiones gaseosas:

1. *La absorción.* Véase la sección 4, "Termodinámica", y la sección 18, "Sistemas líquido-gas". Para columnas de platos véase la sección 18, "Contacto líquido-gas: Columnas de platos". Para columnas empacadas véase la sección 18. "Contacto líquido-gas: Columnas empacadas."
2. *La adsorción.* Véase la sección 16:"Adsorción e intercambio de iones".
3. *La combustión.* Véase la sección 9: "Generación de calor" y "Equipo de procesos de fuego directo". Para incineradores, véase el material presentado en estas subsecciones.
4. *La condensación.* Véanse la sección 10: "Transmisión de calor", la sección 11: "Equipo de transferencia de calor" y la sección 12: "Enfriamiento por evaporación". Para condensadores de contacto directo, véanse la sección 11: "Accesorios del evaporador" y la sección 12: "Enfriamiento por evaporación". Para condensadores por contacto indirecto, véase la sección 10: "Transferencia de calor con cambio de fase" y "Diseño térmico del equipo de transferencia de calor" y la sección 11: "Intercambiadores de calor de casco y tubo" y "Otros intercambiadores de calor para líquidos y gases".

Estas operaciones, que son de rutina en la ingeniería química, se han tratado en forma amplia en otras secciones de este *Manual.*

Absorción

Introducción El diseño técnico del equipo de absorción de gas debe basarse en la aplicación adecuada de los principios de difusión, equilibrio y transferencia de masa, desarrollados en las secciones 4, 14 y 18 de este *Manual.* El requerimiento más importante del diseño del equipo es lograr un contacto íntimo del gas con el líquido, es decir, proporcionar un área grande de entrecara, una elevada intensidad de renovación de la entrecara y la reducción al mínimo de la resistencia que, por lo tanto, eleva al máximo la fuerza impulsora. Este contacto de las fases se logra en diferentes tipos de equipo, los más importantes de los cuales son las columnas de platos y las empacadas. La selección final entre ambas depende de varios criterios a cumplir. Por ejemplo, si la caída de presión a través de la columna es lo suficientemente grande para que los costos de compresión sean significativos, es preferible seleccionar una columna empacada y no de platos, ya que la caída de presión es menor.

En la mayor parte de los procesos que incluyen la absorción de un contaminante gaseoso presente en una corriente de gases de salida, esta última representa el fluido procesado y, por lo tanto, generalmente se conocerán sus condiciones de entrada (velocidad de flujo, composición y temperatura). Es usual que se especifique la temperatura y composición del líquido de entrada y la composición del gas de salida. Por consiguiente, los principales objetivos del diseño de una columna de absorción son la determinación de la velocidad de flujo del disolvente y el cálculo de las dimensiones principales del equipo (la altura y diámetro de la columna necesaria para realizar la operación). Estos objetivos se logran al evaluar, para el disolvente seleccionado con una velocidad determinada de flujo, el número de unidades teóricas de separación (etapas o platos) y convertirlas en unidades prácticas de altura de columna o número de platos reales, mediante las correlaciones existentes.

El procedimiento general de diseño consta de varios pasos a considerar, que incluyen:

1. Selección del disolvente
2. Evaluación de los datos de equilibrio
3. Estimación de los datos de operación (por lo general, este paso consta de un balance de masa y energía; este último es el que determina si el proceso de absorción se puede considerar isotérmico o adiabático).
4. Selección de la columna (si la selección de la columna no es obvia o específica, será necesario realizar los cálculos para los diferentes tipos de columnas y la selección final se basa en consideraciones económicas).
5. Cálculo del diámetro de la columna (para las columnas empacadas, este cálculo se basa por lo general en las condiciones de inundación y, para las columnas de platos, en la velocidad óptima del gas o la capacidad del plato para manejar el líquido).
6. Estimación de la altura de la columna o el número de platos (para columnas empacadas, la altura de la columna se obtiene al multiplicar el número de unidades de transferencia, calculadas a partir de los datos de equilibrio y operación, por la altura de una unidad de transferencia; para columnas de platos, el número de platos teóricos determinado a partir de la gráfica de las líneas de equilibrio y operación, se divide entre la eficiencia global estimada del plato, con lo que se obtiene el número real de platos, que a su vez permite calcular la altura de la columna, con base en el espaciamiento de los platos).
7. Determinación de la caída de presión a través de la columna (para las columnas empacadas, se dispone de correlaciones dependientes del tipo de empaque, los datos de operación de la columna y las propiedades físicas de los constituyentes, mediante las que se estima la caída de presión a través del empaque; para columnas de platos, se obtiene la caída de presión por plato y se multiplica por el número de platos).

Selección del disolvente La selección de un disolvente determinado es muy importante. A menudo se utiliza el agua, por su abundancia y bajo costo, pero las siguientes propiedades también deben considerarse:

1. *Solubilidad de*
porque esto incremen
la cantidad de disolve
micamente similares
lubilidad.
2. *Volatilidad.*
por baja, porque el g
saturado de disolvent
3. *Corrosividad.*
4. *Costo.*
5. *Viscosidad.*
velocidades elevadas
dación, reduce la pre
transferencia de calo
6. *Estabilidad q*
estable y, de ser posib
7. *Toxicidad.*
8. *Bajo punto de*
solvente con bajo pu
disolvente dentro de

Equipo Los prin
pueden clasificar co
1. Columnas em
2. Columnas de
3. Diversos

De las tres categor
para la absorción de
al respecto se presen
muchos textos dispo
Operations of Chem
York, 1976; Sherwo
McGraw-Hill, New
Processes, McGraw-
Operations, 3d ed, M

Adsorción

Introducción El
chos aspectos simila
adsorbente sólido qu
ciones 16 y 19). La
de materia y energía,
nar la altura de la co
depende de los facto

Selección del ads
triales pueden adsor
nicos. Sin embargo,
otras propiedades fís
específicos para una
demostrado que para
vado tiene propieda
vas para los hidroca
vapores orgánicos. L
alúmina activada y
adsorber materiales
presentarse problem
moleculares tambié
agua con contamina
desventaja consider
ción de contaminan

El método norma
utilizar una corrient
y, en la mayor parte
descomposición del
secuencia, se prese
del adsorbato, lo cua
sivo de la capacida
número de ciclos, de

1. *Solubilidad del gas.* Es deseable que el gas sea muy soluble porque esto incrementa la velocidad de absorción y reduce al mínimo la cantidad de disolvente necesario. Por lo general, los disolventes químicamente similares al soluto a absorber proporcionan una buena solubilidad.

2. *Volatilidad.* Es deseable un disolvente con una presión de vapor baja, porque el gas que sale de la unidad de absorción suele estar saturado de disolvente y puede perderse una cantidad considerable.

3. *Corrosividad.*

4. *Costo.*

5. *Viscosidad.* Es deseable una viscosidad baja, porque favorece velocidades elevadas de absorción, mejora las características de inundación, reduce la presión de las gotas y mejora las características de transferencia de calor.

6. *Estabilidad química.* El disolvente debe ser químicamente estable y, de ser posible, no inflamable.

7. *Toxicidad.*

8. *Bajo punto de congelación* De ser posible, se prefiere un disolvente con bajo punto de congelación, porque toda solidificación del disolvente dentro de la columna hace que ésta sea inoperable.

Equipo Los principales tipos de equipo de absorción de gas se pueden clasificar como sigue:

1. Columnas empacadas (operación continua)
2. Columnas de platos (operación intermitente)
3. Diversos

De las tres categorías, la columna empacada es la que más se utiliza para la absorción de contaminantes gaseosos. Información adicional al respecto se presenta en las secciones apropiadas de este *Manual* y en muchos textos disponibles como, por ejemplo, McCabe y Smith, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 3d ed., McGraw-Hill, New York, 1976; Sherwood y Pigford, *Absorption and Extraction*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1952; Smith, *Design of Equilibrium Stage Processes*, McGraw-Hill, New York, 1963; y Treybal, *Mass Transfer Operations*, 3d ed, McGraw-Hill, New York, 1980.

Adsorción

Introducción El diseño del equipo de adsorción de gas es en muchos aspectos similar al diseño del equipo de absorción de gas, con un adsorbente sólido que reemplaza al disolvente líquido (véanse las secciones 16 y 19). La analogía es evidente en la ecuaciones del balance de materia y energía, así como en los métodos utilizados para determinar la altura de la columna. La selección final, como es de esperarse, depende de los factores económicos del proceso global.

Selección del adsorbente Por lo general, los adsorbentes industriales pueden adsorber tanto gases como vapores orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, sus características de adsorción preferencial y otras propiedades físicas hacen que los adsorbentes sean más o menos específicos para una aplicación particular. La experiencia general ha demostrado que para la adsorción de vapores orgánicos el carbón activado tiene propiedades superiores, ya que posee propiedades selectivas para los hidrocarburos y una alta capacidad de adsorción para los vapores orgánicos. Los adsorbentes inorgánicos como, por ejemplo, la alúmina activada y el gel de sílice, también se pueden utilizar para adsorber materiales orgánicos, pero durante la regeneración pueden presentarse problemas. La alúmina activada, el gel de sílice y las cribas moleculares también adsorben, en forma preferencial, el vapor de agua con contaminantes orgánicos. En ocasiones, esto puede ser una desventaja considerable si estos adsorbentes se aplican a la eliminación de contaminantes orgánicos.

El método normal de regeneración de los adsorbentes consiste en utilizar una corriente de vapor, gas inerte (p. cj., nitrógeno) u otro gas y, en la mayor parte de los casos, se obtiene, como mínimo, una ligera descomposición del compuesto orgánico sobre el adsorbente. En consecuencia, se presentan dos problemas: 1) recuperación incompleta del adsorbato, lo cual puede no ser importante y 2) un deterioro progresivo de la capacidad del adsorbente, a medida que se incrementa el número de ciclos, debido al taponamiento de los poros, producido por el carbón formado al descomponerse el hidrocarburo. Cuando se utiliza carbón activado, la regeneración se realiza mediante un proceso a base de vapor y, en consecuencia, se resuelve el problema anterior. Esto no es posible con el gel de sílice o la alúmina activada, porque estos materiales pueden romperse al ponerse en contacto con agua líquida.

En algunos casos, ninguno de los adsorbentes tiene una capacidad suficiente de retención para un contaminante en particular. En estas aplicaciones, un adsorbente con un área superficial grande se impregna con un compuesto inorgánico o, en raras ocasiones, con un compuesto orgánico de alto peso molecular que puede reaccionar químicamente con el contaminante específico. Por ejemplo, los carbones impregnados con yodo se utilizan para la eliminación del vapor de mercurio, y los carbones impregnados con bromo para la eliminación de etileno o propileno. La acción de estos impregnantes es una conversión o reacción catalítica para formar un compuesto no inconveniente o un compuesto que se adsorba con más facilidad. En este caso ya no se aplica la teoría general de adsorción a los efectos totales del proceso. Por ejemplo, la eliminación de mercurio mediante carbón impregnado con yodo se realiza más rápidamente a una temperatura elevada y se puede obtener una mejor eficiencia global que en un sistema a baja temperatura.

Ya que la adsorción se efectúa en el límite de la interfase, el área superficial del adsorbente es una consideración importante. Por lo general, cuanto más grande es el área superficial, mayor será la capacidad de adsorción. Sin embargo, el área superficial debe estar "disponible" en un diámetro específico del poro, dentro del adsorbente. A presiones (o concentraciones) parciales bajas es más eficiente el área superficial en los poros más pequeños a los que el compuesto por absorber puede entrar. A presiones mayores, los poros más grandes adquieren más importancia, en tanto que a concentraciones muy elevadas, se da condensación capilar dentro de los poros y el volumen total del microporo se convierte en el factor limitante.

La acción de las cribas moleculares es un poco diferente a los demás adsorbentes, porque la selectividad está determinada principalmente por las limitaciones del diámetro del poro de la criba molecular específica. Al seleccionar cribas moleculares es importante que el contaminante a eliminar sea menor que el diámetro disponible del poro. Por consiguiente, es importante que el adsorbente particular no sólo tenga afinidad por el contaminante en cuestión sino, además, suficiente área disponible para la adsorción.

Datos de diseño Una vez seleccionado el adsorbente, el siguiente paso consiste en calcular la cantidad de adsorbente requerido y, en ocasiones, se deben considerar otros factores como, por ejemplo, el incremento de temperatura de la corriente gaseosa debido a la adsorción, y la vida útil del adsorbente en las condiciones de operación. El cálculo de las dimensiones y el diseño global del sistema de adsorción depende de las propiedades y características tanto del gas alimentado para su eliminación como del adsorbente. Para propósitos de diseño, debe disponerse de o conocerse la siguiente información:

1. Para la corriente de gas

a). La concentración del compuesto por adsorber (adsorbato).

b). La temperatura.

c). El incremento de temperatura durante la adsorción.

d). La presión.

e). La velocidad de flujo.

f). La presencia de material contaminante para el adsorbente.

2. Para el adsorbente

a). La capacidad de adsorción, al utilizarlo sobre la corriente.

b). El incremento de temperatura durante la adsorción.

c). Operación isotérmica o adiabática.

d). La vida, si la presencia del material contaminante es desfavorable.

e). La posibilidad de efectos catalíticos que causen una reacción química adversa en la corriente gaseosa, o la formación de polimerizantes sólidos en el lecho de adsorción, con el consiguiente deterioro del adsorbente.

f). La densidad masiva

g). El tamaño de partícula, que por lo general se indica como el diámetro medio equivalente de la partícula. Las dimensiones y forma de las partículas afectan tanto las caídas de presión a través del lecho de adsorción como la velocidad de difusión en el interior de las partículas. Si todo lo anterior es igual, los lechos de adsorción que constan de partículas más pequeñas son más eficientes, a pesar de que causan una caída de presión más elevada.

h). Los datos del poro, que son importantes porque permiten eliminar los adsorbentes cuyo diámetro del poro no admita la molécula del compuesto por adsorber.

i). La dureza, que indica los cuidados a tomar en el manejo de los adsorbentes, para evitar la formación de finos indeseables.

j). La información necesaria para la regeneración.

Las técnicas de diseño utilizadas incluyen tanto métodos por etapas como de contacto continuo y se pueden aplicar a operaciones intermitentes, continuas y semicontinuas.

Fenómenos de la adsorción El proceso de adsorción incluye tres pasos necesarios. En primer lugar, el fluido debe entrar en contacto con el adsorbente, para que el compuesto por adsorber se adsorba en forma preferencial o selectiva sobre el adsorbente. A continuación, el fluido no adsorbido debe separarse de la mezcla adsorbente-adsorbato y, por último, el adsorbente debe regenerarse, mediante la eliminación del adsorbato, o bien, desecharse el adsorbente utilizado y reemplazarse por material nuevo. La regeneración se realiza de diferentes modos, que dependen de la naturaleza del adsorbato. Por lo general, los gases y vapores se desorben incrementando la temperatura (ciclo térmico) o reduciendo la presión (ciclo de presión). El ciclo térmico más común se realiza mediante el paso de gas caliente a través del lecho de adsorción en dirección opuesta al flujo existente durante el ciclo de adsorción; con esto se asegura que el gas que pasa por la unidad durante el ciclo de adsorción siempre se encuentre al final con el adsorbente más activo, y que la concentración del adsorbato en el adsorbente, a la salida de la unidad, se mantenga siempre en un nivel mínimo.

En el primer paso, en el que las moléculas del fluido entran en contacto con el adsorbente, se establece un equilibrio entre el fluido adsorbido y el fluido que permanece en la fase fluida. En las figuras 26-5 a 26-7 aparecen varias isotermas experimentales del equilibrio de adsorción, para diferentes compuestos adsorbidos en varios adsorbentes. Considérese la figura 26-5, en la cual la concentración del gas adsorbido sobre el sólido se grafica en función de la presión parcial de equilibrio p° del vapor o gas, a temperatura constante. Por ejemplo, a 40°C, el vapor de propano puro, a una presión de 550 mmHg se encuentra en equilibrio con una concentración de adsorbato en el punto *P* de 0.04 lb de propano adsorbido por lb de gel de sílice. Un incremento en la presión del propano hace que se adsorba más propano. Por otra parte, al disminuir la presión del sistema a *P*, el propano se desorbe del carbón.

En la tabla 26-21 aparece la capacidad de adsorción del carbón activado, para algunos vapores de disolventes comunes.

Equipo de control de la adsorción Si una corriente de gas debe tratarse durante un periodo corto, sólo se requiere por lo general una unidad de adsorción, siempre y cuando se disponga de un intervalo suficiente de tiempo que permita la regeneración entre los ciclos de adsorción. Sin embargo, éste no es el caso usual. Ya que a menudo se requiere una corriente ininterrumpida de gas tratado, es necesario utilizar una o más unidades capaces de operar de este modo. Las unidades se diseñan para manejar los flujos de gas sin interrupciones y se caracterizan por su modalidad de contacto, intermitentes o continuas. En general, el tipo más común de sistema de adsorción utilizado para la eliminación de un contaminante indeseable en una corriente gaseosa consta de varias unidades de lecho fijo, que operan en secuencia, de manera que el flujo de gas permanece ininterrumpido. Generalmente se utiliza un sistema de dos o tres lechos, con uno o dos lechos desviados para su regeneración, mientras que otro está en operación. En la figura 26-8 se muestra un sistema característico de dos lechos; en la figura 26-9 aparece un sistema característico de tres lechos. El tipo de sistema más adecuado para una aplicación particular lo determinan varios factores, que incluyen: la cantidad y velocidad del material a

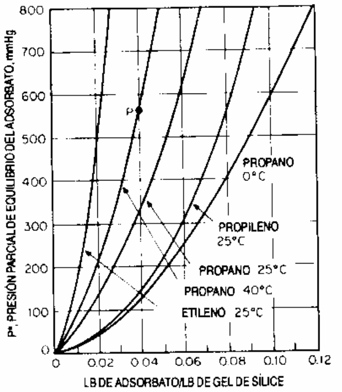


FIG. 26-5 Presiones parciales de equilibrio de ciertos compuestos orgánicos en gel de sílice.

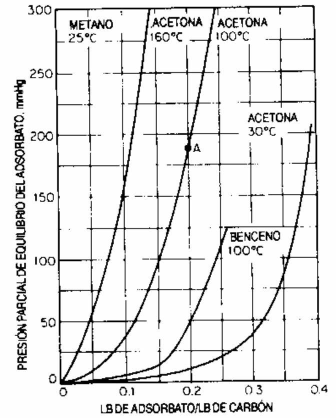


FIG. 26-6 Presiones parciales de equilibrio para ciertos compuestos orgánicos en carbón.

adsorber, el tiempo entre ciclos, el tiempo requerido para la regeneración y, en caso necesario, el tiempo de enfriamiento.

El empleo de un lecho fluidificado es característico en una operación de contacto continuo, para la adsorción de contaminantes gaseosos. En la operación de contacto por etapas, a régimen permanente, el gas fluye hacia arriba a través de una serie de etapas sucesivas de lechos fluidificados, lo que permite un contacto máximo del gas y del sólido en cada etapa. En la figura 26-10 aparece un arreglo característico de este tipo, para una adsorción con etapas múltiples a contracorriente y con regeneración. En la parte superior de la torre, los sólidos, colocados sobre los platos perforados en lechos relativamente poco profundos, entran en contacto a contracorriente, con la corriente de gas que contiene el contaminante; los sólidos del adsorbente se mueven de plato a plato por los vertederos. En la parte inferior de la torre, el adsorbente se regenera, mediante un contacto similar con gas caliente, que desorbe y acarrea el contaminante. Después, el adsorbente regenerado se recircula con aire hasta la parte superior de la torre.

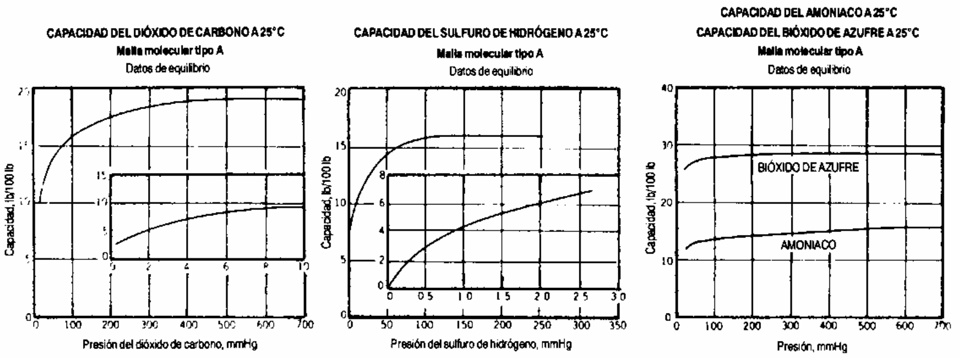


FIG. 26-7 Presiones parciales de equilibrio para ciertos gases en mallas moleculares. (A. J. Buonicore and L. Theodore, *Industrial Control Equipment for Gaseous Pollutants*, vol. 1, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1975.)

TABLA 26-21 Capacidad de adsorción de los disolventes comunes en carbones activados*

Disolvente	% en peso del lecho de carbón†
Acetona	8
Heptano	6
Alcohol isopropílico	8
Cloruro de metileno	10
Percloroetileno	20
Disolvente Stoddard	2–7
1,1,1-tricloroetano	12
Tricloroetileno	15
Triclorotrifluoroetano	8
VM&P nafta	7

*Suponiendo una desorción con vapor entre 5 y 10 psig.
†Por ejemplo, 8 lb de acetona adsorbidas en 100 lb de carbón activado.

A pesar de que el tipo de operación continua y a contracorriente ha encontrado aplicaciones limitadas en la eliminación de contaminantes gaseosos presentes en la corrientes del proceso (p.ej., la eliminación de dióxido de carbono y de compuestos de azufre, como el sulfuro de hidrógeno y el sulfuro de carbonilo), el tipo de operación más común que en la actualidad se utiliza es el adsorbedor de lecho fijo. Los costos relativamente elevados que implica el transporte continuo de partículas sólidas requerido en las operaciones a régimen permanente, hace que la adsorción en lecho fijo sea una opción atractiva y económica. Si la operación intermitente o por lotes es práctica, basta con un sistema sencillo de un solo lecho y ciclos alternados entre las fases de adsorción y regeneración.

Información adicional se presenta en las secciones apropiadas de este *Manual*. Un examen amplio de los principios de diseño del adsorbedor se encuentra en Buonicore y Theodore, *Industrial Control Equipment for Gaseous Pollutants*, vol. 1, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1975.

Combustión

Introducción Muchos compuestos orgánicos liberados por las operaciones de fabricación se pueden convertir en inofensivo dióxido de carbono y agua, mediante una oxidación rápida (reacción química), es decir, una combustión. Para destruir los contaminantes combustibles se utilizan, en forma característica, tres métodos de combustión rápida: **1**) las antorchas (combustión por llama directa), **2**) los combustores térmicos y **3**) los combustores catalíticos. Los métodos térmicos y de antorcha se caracterizan por la presencia de una llama durante la combustión. Los combustores catalíticos utilizan un catalizador metá-

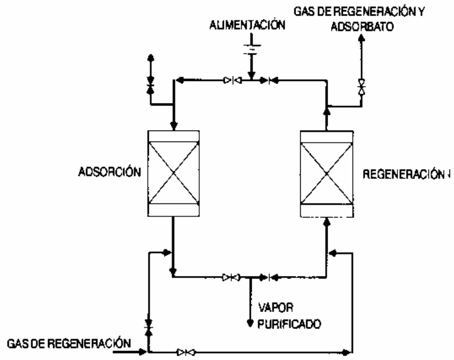


FIG. 26-8 Sistema característico de adsorción de lecho doble.

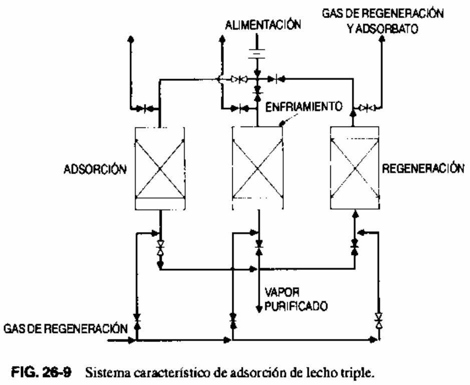


FIG. 26-9 Sistema característico de adsorción de lecho triple.

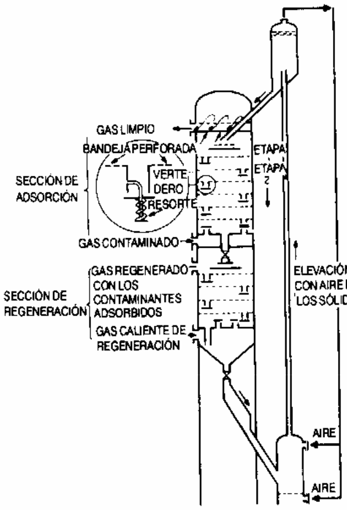


FIG. 29-10 Adsorción de etapas múltiples y a contracorriente, con regeneración.

lico para promover una oxidación rápida y se caracterizan por una combustión sin llama. El proceso de combustión también se conoce como "postcombustión" o "incineración".

Para lograr una combustión completa, es decir la combinación de los elementos combustibles y los compuestos de un combustible con todo el oxígeno que puedan utilizar, es necesario proporcionar el espacio suficiente, el tiempo, la turbulencia y una temperatura lo suficientemente elevada para encender los constituyentes.

Las "tres T" de la combustión —tiempo, temperatura y turbulencia— regulan la velocidad y la integridad de la reacción de combustión. Para una combustión íntegra o completa, el oxígeno debe entrar en contacto íntimo con la molécula del combustible, a una temperatura y durante un periodo suficientes, para completar la reacción. Las reacciones incompletas pueden dar por resultado la generación de aldehídos, ácidos orgánicos, carbón y monóxido de carbono.

Equipo para el control de la combustión Este equipo de control se puede clasificar en tres tipos: 1) antorchas, 2) incineradores térmicos y 3) incineradores catalíticos.

Antorchas En muchas operaciones industriales y especialmente en las plantas químicas y las refinerías de petróleo se producen grandes volúmenes de gases combustibles de desperdicio. Estos gases son resultado de fugas no detectadas en el equipo de operación, de condiciones que alteran la operación normal de la planta y en las que es necesario ventear los gases para evitar presiones elevadas peligrosas para el equipo de operación, de los arranques de las plantas y de paros de emergencia. También puede producirse gran cantidad de gases, como resultado de un producto fuera de especificaciones o por un exceso de producción que no puede venderse. Por lo general, los flujos son intermitentes, con bajas velocidades de flujo durante las perturbaciones importantes, de hasta varios millones de pies cúbicos por hora.

El método preferido de control para excesos de gases y vapores es recuperarlos en un sistema de purga de recuperación. Sin embargo, los grandes volúmenes de gas, especialmente los generados durante condiciones anormales y de emergencia, son difíciles de contener y reprocesar. Hace algunos años, todos los gases de desperdicio se venteaban directamente a la atmósfera. Sin embargo, la diseminación de los gases venteados causaba problemas al medio ambiente y de seguridad. En la actualidad, la práctica consiste en recolectar dichos gases en un sistema cerrado de llamarada y quemarlos conforme son descargados.

A pesar de que las antorchas se pueden utilizar para eliminar los excesos de gases de desperdicio, presentan problemas adicionales de seguridad, que incluyen la posibilidad de explosión, los riesgos de radiación térmica, debidos a la llama y el problema de asfixia tóxica si la llama se apaga. Además de estos aspectos de seguridad, existen varios otros problemas relacionados con las antorchas, que deben considerarse durante el diseño y operación de un sistema de llamarada. Estos problemas se pueden catalogar dentro del área general de las emisiones producidas por antorchas e incluyen: la formación de humo, la luminosidad de la llama, el ruido mientras la antorcha está encendida y la producción de coproductos contaminantes del aire durante la operación de la antorcha.

El poder calorífico o contenido de calor de la corriente de desperdicio a quemar es otra consideración importante. El contenido de calor del gas de desperdicio se puede dividir en dos clases. Los gases pueden mantener o no su propia combustión. En general, un gas de desperdicio con un poder calorífico superior a 7443 kJ/m^3 (200 Btu/ft^3) se puede quemar en una antorcha sin problemas. El contenido de calor se basa en su valor mínimo, para el gas de desperdicio, en la antorcha. Para valores inferiores a 7443 kJ/m^3 quizá sea necesario enriquecer el gas de desperdicio mediante la inyección de otro gas con un poder calorífico más elevado. La adición de este gas de enriquecimiento se conoce como "quema endotérmica". En la práctica se han quemado gases con un contenido de calor tan bajo como 2233 kJ/m^3 (60 Btu/ft^3), pero con una demanda significativa de combustible. Por lo general, no es posible quemar en antorchas un gas con un poder calorífico inferior a 3721 kJ/m^3 (100 Btu/ft^3). Si el flujo de un gas con bajo poder calorífico es continuo, se puede utilizar la incineración térmica o catalítica para deshacerse del gas. Sin embargo, en flujos intermitentes, la quema endotérmica puede ser la única posibilidad.

A pesar de que la mayor parte de las antorchas se utilizan para deshacerse de gases intermitentes de desperdicio, también se emplean algunas antorchas continuas, pero, en general, para volúmenes relativamente pequeños de gases. El contenido de calor de los gases de desperdicio, con grandes volúmenes y un flujo continuo, es demasiado valioso para perderlo en una antorcha. La recuperación del vapor o el empleo de éste como combustible en un calentador de proceso es más conveniente que el uso de la antorcha. Como es necesario agregar combustible adicional al gas, para quemarlo, los grandes flujos continuos de un gas con bajo poder calorífico se pueden quemar, en forma más eficiente, en un incinerador térmico que en la llama de una antorcha.

Por lo general, las antorchas se utilizan para deshacerse de los hidrocarburos. Probablemente, más del 95% de los materiales quemados en antorchas son gases de desperdicio compuestos de gas natural, propano, etileno, propileno, butadieno y butano. Las antorchas se han utilizado con éxito para controlar gases malolientes como, por ejemplo, mercaptanos y aminas, pero al quemar estos gases deben tomarse las precauciones necesarias. A menos que la antorcha sea muy eficiente y proporcione una buena combustión, las emanaciones indeseables pueden escapar sin quemarse y causar problemas.

La combustión del sulfuro de hidrógeno en antorchas debe evitarse, porque es tóxico y su umbral al olfato es bajo. Además, la combustión de cantidades relativamente pequeñas de sulfuro de hidrógeno puede producir suficiente dióxido de azufre, como para dañar las cosechas y causar problemas locales. La combustión en antorchas no se recomienda para gases cuyos productos de combustión pueden causar problemas como, por ejemplo, los que contienen sulfuro de hidrógeno o hidrocarburos clorados.

Incineradores térmicos Los incineradores térmicos o postquemadores se pueden utilizar para gran número de vapores orgánicos, pero a baja concentración. La concentración de estos vapores en el aire debe ser considerablemente inferior al nivel de inflamabilidad (límite inferior de explosión). Como regla, se utiliza un factor de 4 como medida de seguridad. Las reacciones se realizan a temperaturas elevadas para asegurar altas velocidades de reacción química de los vapores orgánicos. Para obtener esta temperatura, es necesario precalentar la corriente de alimentación con energía auxiliar. Junto con la corriente de gas cargada de contaminantes, se alimentan al incinerador, en forma

ır para eliminar los
:mas adicionales de
ɪn, los riesgos de ra-
le asfixia tóxica si la
:idad, existen varios
ıe deben considerar-
le llamarada. Estos
neral de las emisio-
ción de humo, la lu-
:ha está encendida y
ire durante la opera-

ɪrriente de desperdi-
l contenido de calor
:s. Los gases pueden
ɪn gas de desperdicio
00 Btu/ft^3) se puede
ıido de calor se basa
en la antorcha. Para
rio enriquecer el gas
con un poder calorí-
ecimiento se conoce
ı quemado gases con
60 Btu/ft^3), pero con
ı general, no es posi-
rífico inferior a 3721
o poder calorífico es
ica o catalítica para
itentes, la quema en-

se utilizan para des-
nbién se emplean al-
volúmenes relativa-
lor de los gases de
ntinuo, es demasiado
ración del vapor o el
or de proceso es más
cesario agregar com-
ıdes flujos continuos
ıemar, en forma más
ma de una antorcha.
ıhacerse de los hidro-
teriales quemados en
le gas natural, propa-
ntorchas se han utili-
como, por ejemplo,
es deben tomarse las
a sea muy eficiente y
mes indeseables pue-

orchas debe evitarse,
lemás, la combustión
ı de hidrógeno puede
ı dañar las cosechas y
ntorchas no se reco-
ın pueden causar pro-
lfuro de hidrógeno o

térmicos o postque-
e vapores orgánicos,
stos vapores en el aire
ıflamabilidad (límite
factor de 4 como me-
:mperaturas elevadas
ímica de los vapores
:esario precalentar la
lunto con la corriente
incinerador, en forma

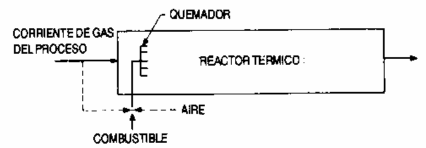


FIG. 26-11 Dispositivo de combustión térmica.

continua, aire y combustible (véase la Fig. 26-11), donde el combustible se quema con aire en la unidad de fuego directo (quemador). El quemador puede utilizar el aire presente en la corriente de desperdicio del proceso, como aire de combustión para el combustible auxiliar, o puede utilizar una fuente distinta de aire externo. Los productos de la combustión y la corriente de alimentación que no reaccionó se mezclan intensivamente y se alimentan a la zona de reacción de la unidad. Los contaminantes presentes en la corriente de gas del proceso reaccionan a temperatura elevada. Los incineradores térmicos requieren por lo general temperaturas de operación que varían entre 650 y 820°C (1200 a 1500°F) para la combustión de la mayor parte de los contaminantes orgánicos (véase la tabla 26-22). A menudo se recomienda un tiempo de residencia de 0.2 a 1.0 s, pero este factor lo dictaminan básicamente las consideraciones cinéticas. Los productos finales se descargan en forma continua a la salida del reactor. La velocidad promedio del gas varía entre un valor tan bajo como 3 m/s (10 ft/s) hasta 15 m/s (50 ft/s). Estas altas velocidades son necesarias para evitar el asentamiento de las partículas (si están presentes) y minimizar los riesgos de un retroflamazo o el peligro de incendio.

Por lo general, el combustible es gas natural. La energía liberada por la reacción se puede recuperar directamente en el proceso o por medio de una recuperación indirecta con un intercambiador externo de calor (véase la Fig. 26-12).

Dadas las altas temperaturas de operación, la unidad debe construirse con metales capaces de soportar estas condiciones. Los dispositivos de combustión se construyen por lo general con una cubierta exterior de acero, que se recubre con material refractario. Normalmente, el espesor de la pared del refractario varía entre 0.05 y 0.23 m (2 a 9 in), dependiendo de las consideraciones de temperatura.

Algunas de las ventajas de los incineradores térmicos son:

1. Eliminación de gases orgánicos
2. Eliminación de partículas orgánicas submicrónicas
3. Facilidad de construcción
4. Requerimientos de poco espacio
5. Bajos costos de mantenimiento

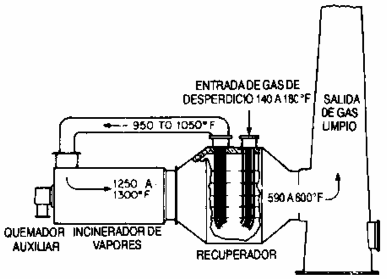


FIG. 26-12 Combustión térmica con recuperación de energía (calor).

Algunas de las desventajas son:

1. Altos costos de operación
2. Riesgo de incendios
3. Posibilidad de retroflamazos

Incineradores catalíticos Los incineradores catalíticos son una opción de los incineradores térmicos. Para reacciones sencillas, los efectos producidos por la presencia de un catalizador son: **1)** incrementar la velocidad de reacción, **2)** permitir que la reacción se lleve a cabo a una temperatura más baja y **3)** reducir el volumen del reactor.

Para la combustión de vapores orgánicos en un incinerador catalítico característico, la corriente de gas se alimenta continuamente al reactor, por medio de un ventilador, a una velocidad que varía entre 3 y 15 m/s (10 a 50 ft/s), pero a una temperatura menor, por lo general de 350 a 425°C (650 a 800°F), que en la unidad térmica. Los gases, que pueden precalentarse o no, pasan a través del lecho de catalizador, donde ocurre la reacción de combustión. Los productos de combustión constituidos por vapor de agua, bióxido de carbono, inertes y vapores no reaccionados, se descargan en forma continua por la salida y a una temperatura elevada. Nuevamente se pueden obtener ahorros de energía al recuperar el calor presente en la corriente de salida.

Los metales de la familia del platino son capaces de promover la combustión a temperatura baja. Otros catalizadores incluyen: varios óxidos de cobre, cromo, vanadio, níquel y cobalto. Estos catalizadores están sujetos a envenenamiento, en especial el producido por los halógenos, los compuestos halogenados y de azufre, el zinc, el arsénico, el plomo, el mercurio y las partículas. Por consiguiente, es importante que las superficies del catalizador estén limpias y activas para asegurar un rendimiento óptimo.

TABLA 26-22 Postquemadores térmicos: condiciones requeridas para un funcionamiento satisfactorio, en diversas aplicaciones de abatimiento

Categoría de abatimiento	Tiempo de residencia del postquemador, s	Temperatura, °F
Emisiones de hidrocarburos: 90 + % de destrucción del HC	0.3–0.5	1100–1250*
Hidrocarburos + CO : 90 + % de destrucción del HC + CO	0.3–0.5	1250–1500
Olores		
50–90% Destrucción	0.3–0.5	1000–1200
90–99% Destrucción	0.3–0.5	1100–1300
99 + % Destrucción	0.3–0.5	1200–1500
Humos y plumas		
Humo blanco (niebla de líquido)		
Abatimiento de la pluma	0.3–0.5	800–1000†
90 + % de destrucción del HC + CO	0.3–0.5	1250–1500
Humo negro (partículas de hollín y combustible)	0.7–1.0	1400–2000

*Pueden requerirse temperaturas de 760 a 816 °C (1400 a 1500°F), si el hidrocarburo tiene un contenido importante de cualquiera de los siguientes compuestos: metano, cellosolve y aromáticos sustituidos (por ejemplo, toluenos y xilenos).

†La operación del abatimiento de la pluma exclusivamente no se recomienda, ya que esto sólo convierte una emisión visible del hidrocarburo en una invisible y, con frecuencia, crea nuevos problemas de olor, por la oxidación parcial en el postquemador.

Los catalizadores pueden ser gránulos porosos, generalmente de forma esférica o cilíndrica y un diámetro que varía entre 0.16 y 1.27 cm (1/16 a 1/2 in). Se recomiendan los diámetros pequeños, pero esto incrementa la caída de presión a través del reactor. Otras configuraciones existentes son: el tipo panal, las bandas y la tela de alambre. Ya que la catálisis es un fenómeno superficial, una de las propiedades físicas de estas partículas es que la superficie interna del poro sea casi infinitamente mayor que la superficie externa.

La conversión catalítica de los reactivos a productos incluye la secuencia siguiente:

1. Transferencia de reactivos y productos desde la superficie externa del catalizador.
2. Difusión de reactivos y productos dentro de los poros del catalizador.
3. Adsorción activada de los reactivos y desorción de los productos en los centros activos del catalizador.
4. Reacción o reacciones en los centros activos de la superficie del catalizador.

Al mismo tiempo, los efectos de la energía producida por la reacción química pueden dar por resultado lo siguiente:

1. Transferencia de calor hacia los centros activos o desde ellos a la superficie de la partícula del catalizador.
2. Transferencia de calor hacia los reactivos y productos, o desde ellos, dentro de la partícula del catalizador.
3. Transferencia de calor hacia las corrientes en movimiento, y desde ellas, dentro del reactor.
4. Transferencia de calor de una partícula de catalizador a otra, dentro del reactor.
5. Transferencia de calor hacia las paredes del reactor y desde ellas

Algunas ventajas de los incineradores catalíticos son:

1. Requerimientos menores de combustibles, en comparación con los incineradores térmicos.
2. Temperaturas menores de operación.
3. Requerimientos mínimos de aislamiento.
4. Riesgos menores de incendio.
5. Problemas menores de retroflamazos.

Las desventajas incluyen:

1. Costo inicial mayor que los incineradores térmicos.
2. Envenenamiento del catalizador.
3. Necesidad de eliminar, en primer lugar, las partículas grandes.
4. Problemas de regeneración del catalizador.

Condensación

Introducción A menudo, una de las técnicas para el control de la contaminación del aire incluye el tratamiento de una corriente de salida, que consta de un vapor contaminante condensable y un gas incondensable. Un método de control para eliminar este tipo de contaminantes presentes en una corriente de gas de proceso es la condensación.

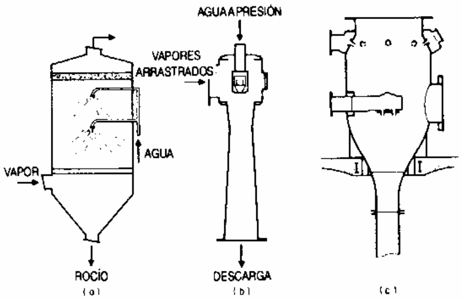


FIG. 26-13 Condensadores característicos de contacto directo. *a*) De cámara de rocío. *b*) De chorro. c) Barométrico.

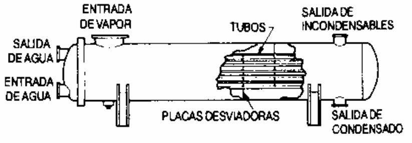


FIG. 26-14 Condensador característico de superficie (cubierta y tubos).

Los condensadores se pueden utilizar para recolectar emisiones condensables descargadas a la atmósfera, en especial cuando la concentración del vapor es elevada. Esto se logra, por lo general, reduciendo la temperatura de la corriente gaseosa, a pesar de que un incremento en la presión produciría el mismo resultado. En la industria se suele utilizar el primer método, ya que los cambios de presión (incluso los pequeños) con grandes velocidades o gastos volumétricos de gas son, con frecuencia, antieconómicos.

Equipo de condensación Existen dos tipos básicos de condensadores utilizados para el control: los de contacto y los de superficie. En los condensadores de contacto se produce un contacto directo entre la corriente de gas y un medio de enfriamiento, para que el vapor se condense y se mezcle con el refrigerante (véase la Fig. 26-13). Sin embargo, el sistema más utilizado es el condensador de superficie (o intercambiador de calor), en el cual el vapor y el medio de enfriamiento están separados por una pared (véase la Fig. 26-14). Ya que no se pueden obtener altas eficiencias de eliminación con bajas concentraciones del vapor condensable, los condensadores se utilizan, en forma característica, para un pretratamiento anterior a otro dispositivo de control más eficiente como, por ejemplo, un incinerador, adsorbedor o absorbedor.

Condensadores de contacto Todos los condensadores tipo rocío, chorro y barométricos utilizan agua u otro tipo de líquido en contacto directo con el vapor a condensar. La diferencia de temperaturas entre el líquido y el vapor es muy pequeña y, en consecuencia, la eficiencia del condensador es elevada, pero se requieren grandes volúmenes de líquido. Si el vapor es soluble en el líquido, el sistema es básicamente del tipo de absorción. Si el vapor no es soluble, el sistema es un condensador verdadero, en el cual la temperatura del vapor debe ser inferior al punto de rocío. En raras ocasiones se utilizan los condensadores de contacto directo para la eliminación de vapores de disolventes orgánicos, porque el condensado contendrá una mezcla de agua y sustancias orgánicas, que debe separarse o tratarse antes de desecharla. Sin embargo, estos equipos son el método más eficiente para la eliminación de calor en corrientes de gases calientes cuando la recuperación de los compuestos orgánicos no es importante.

En un condensador de contacto directo, una corriente de agua u otro líquido de enfriamiento se pone en contacto con el vapor a condensar. La corriente líquida que sale de la cámara contiene el líquido original de enfriamiento más las sustancias condensadas. La corriente gaseosa que sale de la cámara contiene los gases incondensables y los vapores condensables que no se condensaron, y es razonable suponer que los vapores condensables que salen con la corriente gaseosa están saturados. En consecuencia, la temperatura de la corriente de gas de salida es la que determina la eficiencia de recolección del condensador.

Las ventajas de los condensadores de contacto son que **1**) se pueden utilizar para producir un vacío y, en consecuencia, crear un arrastre de vapores olorosos y, además, reducir el punto de ebullición en digestores y tanques, **2**) por lo general, son más sencillos y económicos que los condensadores de superficie, y **3**) normalmente tienen una capacidad considerable de eliminación de olores, debido a la mayor disolución del condensado (se requieren 13 lb de agua a 60°C para condensar 1 lb de vapor a 212°F y enfriar el condensado hasta una temperatura de 140°F). La principal desventaja es el gran consumo de agua. Dependiendo de la naturaleza del condensado, el olor en el agua de desperdicio se puede eliminar mediante el tratamiento con productos químicos.

Los condensadores de contacto directo incluyen la transferencia simultánea de calor y masa. Los procedimientos de diseño disponibles

para absorción, humi
aplicar con algunas r
Condensadores d
(condensadores de c
trias de procesos qu
equipo anticontamir
de huellas de impur
superficie, el refrige
vapor. Existen vario
yen los de tubos y c
con aletas, los que ti
res. El empleo de lo
jas. El condensado s
refrigerante, ésta se
de enfriarse con aire
dores de superficie
veces menos conde
más costosos y requ
de contacto directo.

CONTROL DE L
PARTÍCULAS

Existen cuatro tipos
emisiones de partíc

1. Recolectores
2. Depuradores
3. Precipitador
4. Filtros de tel

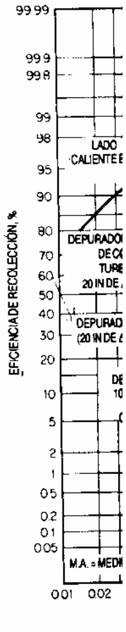
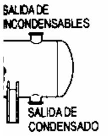


FIG. 26-15 Curvas para el control de la (
1980).]



cubierta y tubos).

ctar emisiones con-
l cuando la concen-
general, reduciendo
ue un incremento en
lustria se suele utili-
ión (incluso los pe-
métricos de gas son,

ísicos de condensa-
y los de superficie.
in contacto directo
niento, para que el
te (véase la Fig. 26-
condensador de su-
el vapor y el medio
véase la Fig. 26-14).
de eliminación con
s condensadores se
tamiento anterior a
por ejemplo, un in-

nsadores tipo rocío,
líquido en contacto
temperaturas entre
uencia, la eficiencia
andes volúmenes de
ema es básicamente
l sistema es un con-
vapor debe ser infe-
n los condensadores
s de disolventes or-
cla de agua y sustan-
s de desecharla. Sin
nte para la elimina-
ndo la recuperación

riente de agua u otro
l vapor a condensar.
e el líquido original
La corriente gaseosa
sables y los vapores
ible suponer que los
aseosa están satura-
nte de gas de salida
l condensador.
on que 1) se pueden
, crear un arrastre de
ullición en digesto-
s y económicos que
e tienen una capaci-
o a la mayor disolu-
0°C para condensar
una temperatura de
no de agua. Depen-
el agua de desperdi-
roductos químicos.
a la transferencia si-
diseño disponibles

para absorción, humidificación, torres de enfriamiento, etc., se pueden aplicar con algunas modificaciones.

Condensadores de superficie Los condensadores de superficie (condensadores de contacto indirecto) son muy utilizados en las industrias de procesos químicos. Estos condensadores se emplean como equipo anticontaminante para la recuperación, control y eliminación de huellas de impurezas o contaminantes. En los condensadores de superficie, el refrigerante no entra en contacto con el condensado del vapor. Existen varios tipos de condensadores de superficie, que incluyen los de tubos y casco, los ventiladores con aletas, los de horquillas con aletas, los que tienen una sección de tubos con aletas y los tubulares. El empleo de los condensadores de superficie tiene varias ventajas. El condensado salobre se puede recuperar. Si se utiliza agua como refrigerante, ésta se puede volver a utilizar, o bien el condensador puede enfriarse con aire si no se dispone de agua. Además, los condensadores de superficie requieren menos agua y producen entre 10 y 20 veces menos condensado. Su desventaja es que, por lo general, son más costosos y requieren más mantenimiento que los condensadores de contacto directo.

CONTROL DE LA FUENTE DE EMISIONES DE PARTÍCULAS

Existen cuatro tipos usuales de equipo utilizados para el control de las emisiones de partículas:

1. Recolectores mecánicos
2. Depuradores en húmedo
3. Precipitadores electrostáticos
4. Filtros de tela

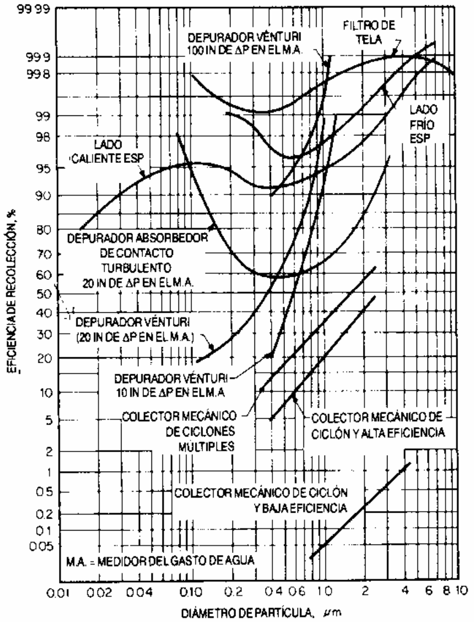


FIG. 26-15 Curvas de eficiencia fraccional de los dispositivos convencionales para el control de la contaminación del aire. [*Chem. Eng.* **87**(13), 83 (junio 30, 1980).]

Cada uno de estos equipos se analiza en la sección 20 de este *Manual*, "Separación de gases y sólidos". En la figura 26-15 se comparan las eficiencias del equipo convencional para el control de la contaminación del aire con eliminación de partículas. Estas curvas de eficiencia en porcentaje indican que el equipo es menos eficiente en la eliminación de partículas con un tamaño que varía entre 0.1 y 1.0 μm. En los depuradores en húmedo y los filtros de tela se pueden eliminar en forma eficiente partículas pequeñas (0.1 μm) gracias a la difusión browniana. Cuanto más pequeña sea la partícula, más intenso será su movimiento browniano y más fácil su recolección mediante las fuerzas de difusión. Las partículas mayores (> 1 μm) se recolectan principalmente por impacto y la eficiencia de eliminación se incrementa en forma proporcional al tamaño de la partícula. El punto mínimo de la curva de porcentaje de eficiencia para depuradores y filtros se presenta en el intervalo de transición entre la eliminación por movimiento browniano y la realizada por impacto.

Una situación hasta cierto punto similar se observa en los precipitadores electrostáticos. Las partículas mayores a aproximadamente 1 μm tienen movilidad elevada, porque se encuentran altamente cargadas. Las menores a unos décimos de micrómetro pueden lograr movilidades moderadas, incluso con una carga pequeña, debido al deslizamiento aerodinámico. La eficiencia mínima de recolección se presenta por lo general en el intervalo de transición, entre 0.1 y 1.0 μm. La situación se complica aún más porque no todas las partículas menores a 0.1 μm se cargan en un campo iónico. Por consiguiente, la eficiencia de eliminación de las partículas muy pequeñas disminuye, después de llegar a un máximo en el intervalo submicrónico.

En general, la industria tiende a utilizar, cuando es posible, filtros de bolsas para el control de las emisiones de partículas. Los filtros de bolsas proporcionan una eficiencia de recolección muy elevada, son sistemas de recolección en seco y relativamente fáciles de operar y mantener, un aspecto importante para el éxito del diseño del equipo de control. Otra ventaja de estos equipos es que la corriente de gas limpio que sale del filtro de bolsas se puede regresar a la planta, con lo que se reducen los requerimientos de aire de repuesto y calentamiento.

Mejoras en la tecnología de control que existe para partículas finas y el desarrollo de técnicas avanzadas son metas prioritarias de la investigación. Los dispositivos convencionales de control tienen ciertas limitaciones. Por ejemplo, los precipitadores están limitados por la magnitud de la carga en la partícula, el campo eléctrico y el rearrastre de polvo. Además, la resistividad del material de la partícula puede afectar en forma adversa tanto la carga como el campo eléctrico. Se requieren avances para solucionar el problema de la resistividad y ampliar el funcionamiento de los precipitadores, sin el límite impuesto por la resistividad (véase Buonicore, Reynolds y Theodore, "Control Technology for Fine Particulate Emissions", DOE Rep. ANL/ECT-5, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., octubre, 1978). Los desarrollos recientes de diseño, con potencial para mejorar el rendimiento de los precipitadores incluyen la energización por pulsos, la ionización mediante un haz de electrones, el espaciamiento amplio de los platos y las unidades precargadas [Balakrishnan et. al., "Emerging Technologies for Air Pollution Control", *Pollut. Eng.*, **11**, 28-32 (noviembre, 1979); "Pulse Energization", *Environ. Sci. Technol.*, **13**(9), 1044 (1974); y Midkaff, "Change in Precipitator Design Expected to Help Plants Meet Clean Air Laws", *Power*, **126** (10), 79 (1979)].

Los filtros de tela están limitados por las dimensiones físicas y la vida de la bolsa. Se pueden tolerar algunos sacrificios en la eficiencia si se pueden lograr razones aire-tela más elevadas sin reducir la vida de la bolsa (sistemas mejorados de chorro pulsatorio). También se pueden obtener mejoras en la filtración de la tela al incrementar los efectos electrostáticos, que pueden contribuir a la rápida formación de una torta filtrante después de la limpieza.

La tecnología de los depuradores está limitada por la incrustación y el ensuciamiento, la confiabilidad general y el consumo de energía. En la actualidad, se investiga detalladamente el empleo de fuerzas complementarias, que actúen sobre las partículas para incrementar su crecimiento o, en otras palabras, para que faciliten su recolección con

menores caídas de presión. El desarrollo de depuradores electrostáticos y por condensación con flujo de fuerzas es un paso en este sentido.

El efecto electrostático se puede incorporar a los depuradores en húmedo, al cargar las partículas y/o las gotas de licor por depurar. Los depuradores electrostáticos también pueden alcanzar la misma eficiencia que se logra en los depuradores de alta energía, pero con una entrada de potencia considerablemente menor. Sus principales desventajas son el mayor mantenimiento debido al equipo eléctrico y un costo de capital más elevado.

Los depuradores por condensación con flujo de fuerzas combinan los efectos de la fuerza de flujo (difusioforesis y termoforesis) y la condensación del vapor de agua, para poner en contacto los gases húmedos y calientes con el líquido subenfriado y/o vapor inyectado al gas saturado.

La investigación ha demostrado que gran parte de estos dispositivos nuevos pueden eliminar partículas finas (véase la Fig. 26-16). A pesar de encontrarse limitados en términos de su comercialización, estos sistemas pueden encontrar aplicación en muchas industrias.

MEDICIÓN DE LAS EMISIONES

Introducción Antes del diseño y/o la selección del equipo de control es necesario realizar un análisis cuantitativo preciso de la descarga de contaminantes producidos en un proceso. Si la unidad está bien diseñada con base en el empleo de los datos de emisiones, como entrada al dispositivo de control, y de los requerimientos reglamentados como límites máximos de salida, la mayor parte de los contaminantes se pueden controlar sin problemas.

El muestreo es la clave del análisis de la fuente. Los métodos y técnicas de muestreo varían en su complejidad, de acuerdo con la tarea específica; por consiguiente, para el diseño de la función de muestreo

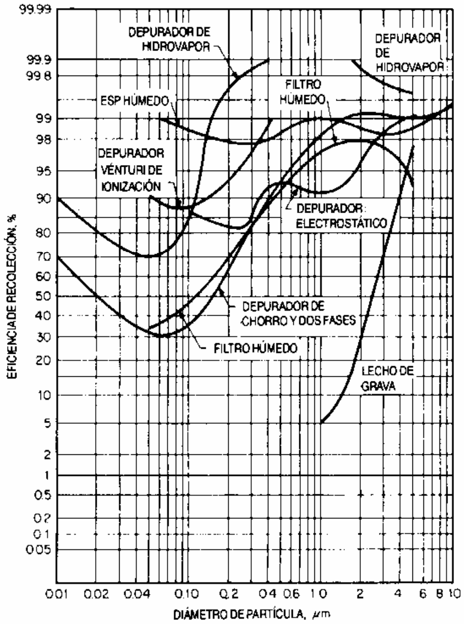


FIG. 26-16 Curvas de eficiencia fraccional de los nuevos dispositivos para el control de la contaminación del aire. [*Chem. Eng.*, **87**(13), 85 (junio 30, 1980).]

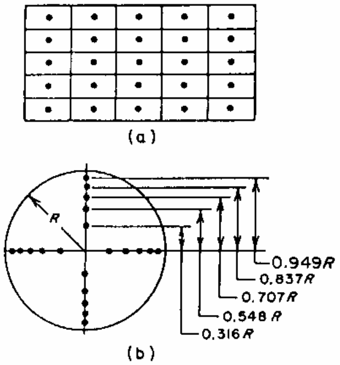


FIG. 26-17 Ubicación de los puntos transversales para mediciones de velocidad o para el muestreo de puntos múltiples. *a*) Chimenea rectangular (mídase al centro de un mínimo de nueve áreas iguales). *b*) Chimenea circular (20 puntos transversales).

se requiere un buen conocimiento técnico y sentido común. El muestreo se realiza para medir las cantidades o concentraciones de los contaminantes en las corrientes de los gases de salida, para medir la eficiencia del dispositivo de abatimiento de la contaminación, para guiar al diseñador del equipo y las instalaciones para el control de la contaminación y/o evaluar la contaminación producida por un proceso o una fuente. Una medición completa requiere la determinación de la concentración y las características de los contaminantes, así como la corriente de gas asociada. La mayor parte de las limitaciones legales requieren las velocidades de masa de las emisiones; en consecuencia, se necesitan los datos de concentración y velocidad de flujo volumétrico.

La selección de un sitio de muestreo y el número de puntos de muestreo requeridos se basan en el intento de obtener una muestra representativa. Para lograrlo, el sitio de muestreo debe estar cuando menos a ocho diámetros de la chimenea o ducto corriente abajo, o dos diámetros arriba de cualquier codo, expansión, contracción, válvula, accesorio o llama visible.

Una vez determinado el sitio de muestreo, la sección transversal de la chimenea o ducto se divide en varias áreas iguales, cuyo centro es el punto donde debe tomarse la medición. Para chimeneas rectangulares, la sección transversal se divide en áreas iguales de la misma forma, y los puntos transversales se ubican en los centros de cada área, como se aprecia en la figura 26-17*a*. Debe seleccionarse la razón de longitud a ancho de cada área elemental. Para chimeneas circulares, la sección transversal se divide en áreas anulares iguales y los puntos transversales se colocan en el centroide de cada área. En la tabla 26-23 aparecen las ubicaciones de los puntos transversales como un porcentaje del diámetro de la chimenea, desde la pared interior hasta el punto transversal, para el muestreo en chimeneas circulares. Con base en la figura 26-18 se puede estimar el número de puntos transversales necesarios para cada una de las dos perpendiculares, en una chimenea determinada.

Una vez establecidos los puntos transversales, se realizan mediciones de velocidad para determinar el flujo de gas. La velocidad del gas en la chimenea se evalúa por lo general por medio de un tubo Pitot y un manómetro de presión diferencial. Cuando la velocidad es muy baja [inferior a 3 m/s (10 ft/s)] y cuando no se requiere una gran exactitud, se puede utilizar un anemómetro. Para gases en tuberías pequeñas y a velocidades o presiones relativamente altas se utilizan medidores Venturi o de disco y orificio, que son tan valiosos como los dispositivos de medición permanentes o continuos.

Una vez establecido el perfil de flujo, se considera la técnica de muestreo. Ya que la recolección de la muestra se puede simplificar y reducir en forma significativa con base en las características de flujo,

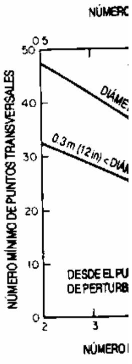


FIG. 26-18 Númei

es mejor terminar l
o medir las concer

Metodología d
visan los métodos
xido de azufre, los
no e hidrocarburos
comúnmente a pr
principal interés e
cado bibliografía
nantes, para que
con objeto de obte

Cada método d
la obtención de l
métodos específic
probar debe opera
dad nominal y co

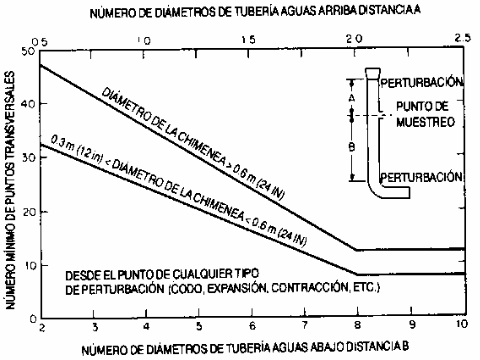


FIG. 26-18 Número mínimo de puntos de muestreo.

es mejor terminar las mediciones del perfil de flujo antes de muestrear o medir las concentraciones de los contaminantes.

Metodología de muestreo En las siguientes subsecciones se revisan los métodos específicos de muestreo para las partículas, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, fluoruros, monóxido de carbono e hidrocarburos, porque éstos son los contaminantes que se someten comúnmente a prueba. En todos los procedimientos de muestreo, el principal interés es obtener una muestra representativa; EPA ha publicado bibliografía de los métodos de muestreo de todos estos contaminantes, para que en la prueba se apliquen procedimientos uniformes con objeto de obtener una muestra representativa.

Cada método de muestreo requiere el uso de equipo complejo para la obtención de la muestra, que debe calibrarse y operarse según los métodos especificados en la referencia. Además, el proceso o fuente a probar debe operarse casi siempre de un modo específico, a la capacidad nominal y con los procedimientos normales.

Velocidad y velocidad de flujo volumétrico EPA ha publicado el Método 2 como una técnica de referencia en la determinación de la velocidad y la velocidad de flujo o gasto volumétrico del gas en la chimenea. En diversos puntos designados para el muestreo, que representan porciones iguales del volumen de la chimenea (áreas en la chimenea) se miden la velocidad y temperatura, con los instrumentos mostrados en la figura 26-19.

Las mediciones para determinar la velocidad de flujo volumétrico requieren por lo general unos 30 minutos. Ya que las velocidades de muestreo dependen de la velocidad del gas en la chimenea, normalmente se realiza una verificación preliminar de la velocidad, antes de la prueba de contaminantes, que ayude en la selección del equipo adecuado y en la determinación de la velocidad aproximada de muestreo para la prueba.

Generalmente, la velocidad de flujo volumétrico determinada por este método se encuentra dentro de ±10% de la velocidad verdadera del flujo volumétrico.

Peso molecular y CO_2 u O_2 El Método 3 de EPA se utiliza para determinar el contenido de bióxido de carbono o de oxígeno y el peso molecular de la corriente de gas en la chimenea. Con base en el empleo que se pretende dar a los datos, estos valores también se pueden obtener con una muestra integrada (véase la Fig. 26-20) o una muestra tomada al azar (véase la Fig. 26-21).

El muestreo tomado al azar se utiliza principalmente para determinar el peso molecular seco de la corriente de gas. La probeta de muestreo se coloca en el centro de la chimenea y la muestra se extrae directamente y se pasa a un analizador Orsat o a un analizador tipo Fyrite para gases de combustión. A continuación, se analiza la muestra para determinar el contenido de bióxido de carbono y oxígeno. Con estos datos se puede calcular el peso molecular de la corriente de gas.

Contenido de humedad El Método 4 de EPA es la técnica de referencia para la determinación del contenido de humedad del gas de la chimenea. En algunos cálculos se requiere el contenido de humedad para estimar las velocidades de emisión de los contaminantes.

Se toma una muestra en varios puntos designados en la chimenea, que representan áreas iguales. La probeta de muestreo se coloca en cada uno de los puntos de muestreo y el aparato se ajusta para tomar una muestra a velocidad constante. A medida que los gases pasan a

TABLA 26-23 Ubicaciones de los puntos transversales en las chimeneas circulares

Número del punto transversal sobre el diámetro	Número de puntos transversales sobre el diámetro									
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	4.4	3.3	2.5	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	14.7	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3	29.5	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4	70.5	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5	85.3	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6	95.6	80.5	65.8	35.5	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7		89.5	77.4	64.5	36.6	29.8	23.6	20.4	18.0	16.1
8		96.7	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9			91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.1	23.0
10			97.5	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11				93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3
12				97.9	90.1	83.1	76.4	69.4	60.7	39.8
13					94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2
14					98.2	91.5	85.4	79.6	73.9	67.7
15						95.1	89.1	83.5	78.2	72.8
16						98.4	92.5	87.1	82.0	77.0
17							95.6	90.3	85.4	80.6
18							98.6	93.3	88.4	83.9
19								96.1	91.3	86.8
20								98.7	94.0	89.5
21									96.5	92.1
22									98.9	94.5
23										96.8
24										98.9

NOTA: Las cifras en la tabla son los porcentajes del diámetro de la chimenea, desde la pared interna hasta el punto transversal.

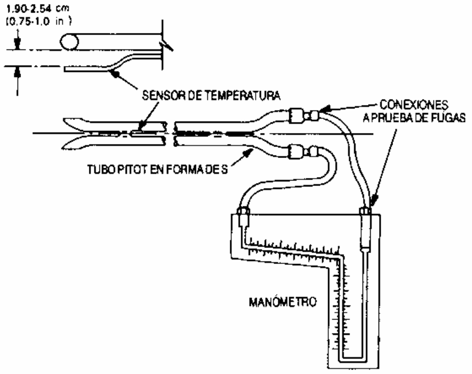


FIG. 26-19 Sistema de medición de velocidad.

través del aparato, un filtro recolecta las partículas, extrae la humedad y se mide el volumen de muestra. A continuación se mide la humedad recolectada y se calcula el contenido de humedad de la corriente gaseosa. En la figura 26-22 aparece un esquema del aparato de muestreo utilizado en este método de referencia.

Partículas Los procedimientos para la prueba de una fuente de emisiones de partículas son más detallados que los utilizados en el muestreo de gases. Ya que las partículas muestran efectos de inercia y no se encuentran distribuidas uniformemente dentro de la chimenea, el muestreo para obtener una muestra representativa es más complejo que el utilizado para los contaminantes gaseosos. El Método 5 de EPA (véase la Fig. 26-23) es el procedimiento que comúnmente se utiliza para determinar las emisiones de partículas procedentes de una fuente estacionaria. En el Método 17 de EPA se presentan las guías para el muestreo dentro de la chimenea.

Según el Método 5 (salvo cuando se aplica a generadores de vapor que utilizan combustibles fósiles), una partícula se define como cualquier material recolectado a 121°C (250°F) en un medio filtrante. El aparato de muestreo utilizado en el Método 5 se diseñó para atrapar partículas a esta temperatura específica. La mayor parte de los estados aceptan el Método 5, aunque difieren en la definición de partícula. Sin embargo, el aparato de muestreo puede modificarse para conformarse con la definición de partícula de cada estado. Por ejemplo, un estado puede definir la partícula como cualquier material recolectado en las

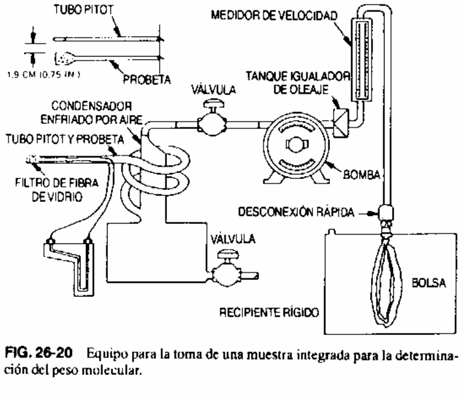


FIG. 26-20 Equipo para la toma de una muestra integrada para la determinación del peso molecular.

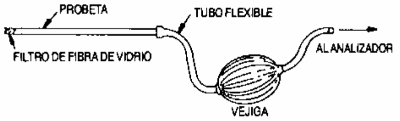


FIG. 26-21 Equipo para la toma de una muestra al azar, para la determinación del peso molecular.

condiciones de la chimenea, definición que permite que el medio filtrante se coloque dentro de la chimenea.

Al realizar la prueba de una fuente determinada de partícula, las muestras se toman en varios puntos de muestreo designados en la chimenea que representan áreas iguales. En cada punto de muestreo se mide la temperatura, el peso molecular, la velocidad y la presión estática de la corriente de gas cargada de partículas. La probeta de muestreo se coloca en el primer punto de muestreo y se ajusta el aparato para tomar una muestra en las condiciones medidas en este punto, y el proceso se repite en forma continua hasta que se ha tomado una muestra en cada punto designado de muestreo. Para lograr resultados válidos en la prueba de la fuente emisora de partículas, la muestra debe tomarse en forma isocinética. La medición de las condiciones de la chimenea permite que se ajuste la velocidad de muestreo, para cumplir con este requerimiento.

A medida que la corriente de gas pasa a través del aparato de muestreo, las partículas quedan atrapadas en el filtro, se extrae la humedad y se mide el volumen de la muestra. Al terminar el muestreo, el material recolectado se recupera y se envía al laboratorio para una determinación o análisis gravimétrico.

Dióxido de azufre El Método 6 de EPA es la técnica de referencia para determinar las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) producidas por todas las fuentes estacionarias, salvo las plantas de ácido sulfúrico. A medida que el gas pasa por el aparato de muestreo (véase la Fig. 26-24), se extrae la nube de ácido sulfúrico y el trióxido de azufre, el SO_2 se elimina por medio de una reacción química con una solución de agua oxigenada y, por último, se mide el volumen de gas de la muestra. Al terminar la corrida, la nube de ácido sulfúrico y el trióxido de azufre se desechan y el material recolectado que contiene el SO_2 se recupera para su análisis en el laboratorio. La concentración de SO_2 en la muestra se determina por titulación.

Para estimar la velocidad total de emisión de masa de SO_2 es necesario medir el contenido de humedad y la velocidad del gasto o flujo volumétrico de la corriente de gases de salida.

Para el Método 6, el tiempo mínimo de muestreo es de 20 minutos por muestra y dos muestras separadas constituyen una corrida. Se requieren tres corridas, que dan por resultado seis muestras. Entre cada muestra se requiere un intervalo de 30 minutos. Si se necesita una muestra más grande, se requerirán mayores tiempos de muestreo.

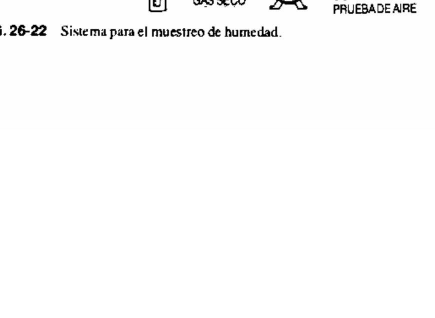


FIG. 26-22 Sistema para el muestreo de humedad.

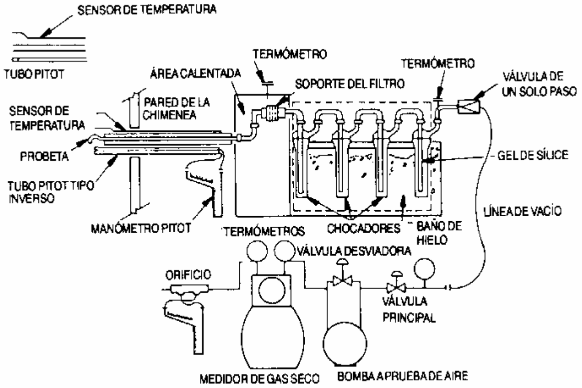


FIG. 26-23 Aparato para muestrear partículas por el Método 5 de EPA.

Con este método se pueden determinar concentraciones en la chimenea de 50 a 10 000 ppm de dióxido de azufre. Se ha determinado que el límite mínimo detectable es 3.4 mg de SO_2 por metro cúbico de gas (2.1×10^{-7} lb de SO_2 por pie cúbico de gas).

Óxidos de nitrógeno (NO_x) El Método 7 de EPA es la técnica de referencia para la determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno producidos por una fuente estacionaria. El muestreo de los NO_x con este método es relativamente sencillo si se utiliza el equipo adecuado.

La probeta de muestreo se coloca en cualquier lugar dentro de la chimenea y se saca una muestra tomada al azar en un matraz al vacío. El matraz contiene una solución de ácido sulfúrico y agua oxigenada, que reacciona con los óxidos de nitrógeno. Para el cálculo de la velocidad total de emisión de masa es necesario determinar el volumen y contenido de humedad de la corriente del gas de salida. La muestra se envía al laboratorio, donde por métodos colorimétricos se determina la concentración de los óxidos de nitrógeno, salvo el óxido nitroso.

Cada muestra tomada al azar se obtiene con bastante rapidez (15 a 30 s) y cuatro muestras al azar constituyen una corrida; se requieren un total de 12 muestras al azar para una serie completa de tres corridas. Entre cada muestra tomada al azar debe existir una intervalo de 15 minutos. Se ha determinado que el intervalo de este método es de 400 mg de NO_x (como NO_2) por metro cúbico estándar seco (sin dilución). En la figura 26-25 aparece un esquema del aparato de muestreo para la prueba de una fuente con emisiones de NO_x.

Monóxido de carbono (CO) El Método 10 de EPA es la técnica de referencia para determinar las emisiones de monóxido de carbono producidas por una fuente estacionaria. Con base en las condiciones de operación, se requerirá una muestra integrada o continua de gas.

Cuando las condiciones de operación son uniformes y permanentes (es decir, si no existen fluctuaciones en la velocidad de flujo ni en la concentración de CO en la corriente de gas) se puede utilizar el método de muestreo continuo. La probeta de muestreo se coloca en cualquier lugar de la chimenea, de preferencia cerca del centro. La muestra se puede tomar a cualquier velocidad de muestreo conveniente y constante. A medida que la corriente de gas pasa a través del aparato de muestreo, se extrae la humedad y el bióxido de carbono presentes en la corriente del gas de muestra. Después se mide la concentración de CO por medio de un analizador infrarrojo sin dispersión, que da lecturas directas de la concentración de CO.

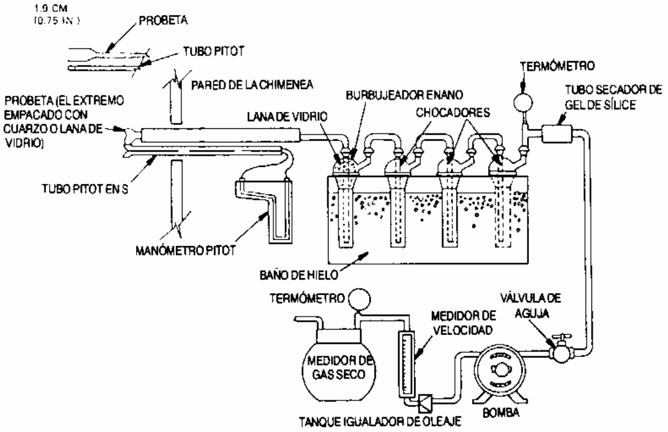


FIG. 26-24 Sistema de muestreo de bióxido de azufre, por el Método 6 de EPA.

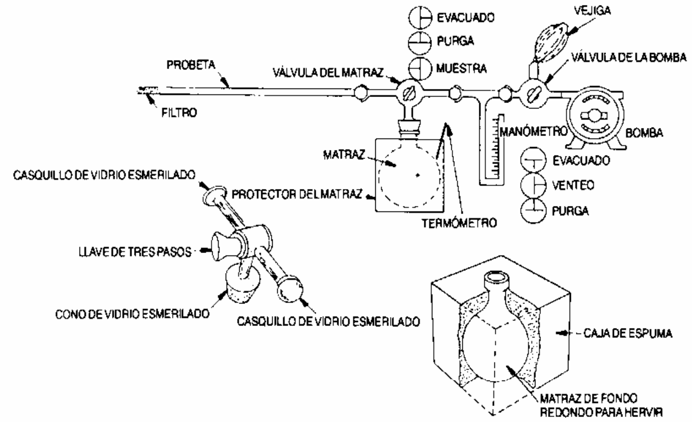


FIG. 26-25 Sistema de muestreo de óxido de nitrógeno, por el Método 7 de EPA.

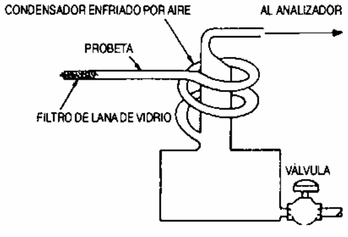


FIG. 26-26 Sistema para el muestreo continuo de CO.

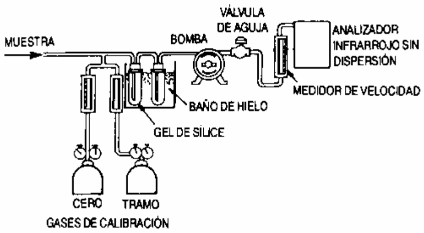


FIG. 26-27 Aparato para el muestreo de CO.

En la figura 26-26 aparece un esquema del aparato de muestreo ensamblado que se utiliza para determinar las concentraciones de CO por el método de muestreo continuo.

El método de muestreo integrado se requiere cuando la operación de la fuente es uniforme pero no permanente (es decir, cuando pueden ocurrir fluctuaciones en la velocidad de flujo). Para tomar una muestra integrada, la probeta de muestreo se coloca en cualquier punto cerca del centro de la chimenea y la velocidad de muestreo se ajusta en forma proporcional a la velocidad del gas en la chimenea. A medida que los gases pasan por el aparato de muestreo, se extrae la humedad y la muestra de gas se recolecta en una bolsa flexible. Luego, el análisis de la muestra se realiza en el laboratorio mediante un analizador infrarrojo sin dispersión. Antes de pasar la muestra por el analizador se deben extraer la humedad residual y el bióxido de carbono presentes en la muestra.

En la figura 26-27 se muestra un esquema del aparato ensamblado para el muestreo integrado de CO.

Este método requiere generalmente de un periodo de muestreo de 1 h. Los tiempos de muestreo se especifican en el estándar aplicable; por ejemplo, las normas para las refinerías de petróleo requieren periodos de muestreo de 1 h o más.

Para el Método 10 se ha determinado que la concentración mínima detectable de CO es de 20 ppm en un intervalo de 1 a 1000 ppm.

Fluoruros Para determinar las emisiones totales de fluoruros producidas por una fuente estacionaria existen dos métodos de referencia de EPA, el 13*A* y el 13*B*. La diferencia entre ambos es el procedimiento analítico para determinar los fluoruros totales. Los fluoruros se pueden presentar en forma de partículas o gases; las partículas se retienen en un filtro, y los fluoruros gaseosos se extraen por reacción química con agua.

Las muestras, tanto para el Método 13*A* como para el 13*B* se obtienen mediante el procedimiento descrito en el Método 5, para partículas. A medida que la corriente de gas pasa a través del aparato de muestreo, se remueven los fluoruros gaseosos por reacción química con agua, las partículas de fluoruro quedan atrapadas en el filtro y se mide el volumen de la muestra. La muestra se recupera y se envía al laboratorio para su análisis.

Los procedimientos de los Métodos 13*A* y 13*B* son complejos y debe realizarlos un químico experimentado. El Método 13*A* es un método colorimétrico, en tanto que el 13*B* utiliza un electrodo específico de iones.

Por lo general, para ambos métodos se requiere un periodo de muestreo de 1 h. Los tiempos de muestreo se especifican en el estándar aplicable, por ejemplo, las normas aplicables a plantas de superfosfato triple requieren muestreos de 1 h o más. En el estándar se establece también el volumen mínimo de muestra que determina la longitud mínima del periodo de muestreo.

El intervalo de determinación del Método 13*A* es de 0 a 1.4 mg de fluoruro por mililitro y el del Método 13*B* es de 0.2 a 2000 mg de fluoruro por mililitro. En la figura 26-28 aparece un esquema del aparato ensamblado de muestreo para fluoruros que se utiliza en ambos métodos.

Compuestos orgánicos e hidrocarburos EPA ha publicado dos métodos de referencia para la prueba de la fuente relacionados con los compuestos organicos y los hidrocarburos, el Método 23 para la determinación de los compuestos orgánicos halogenados producidos por fuentes estacionarias, y el Método 25 para la determinación

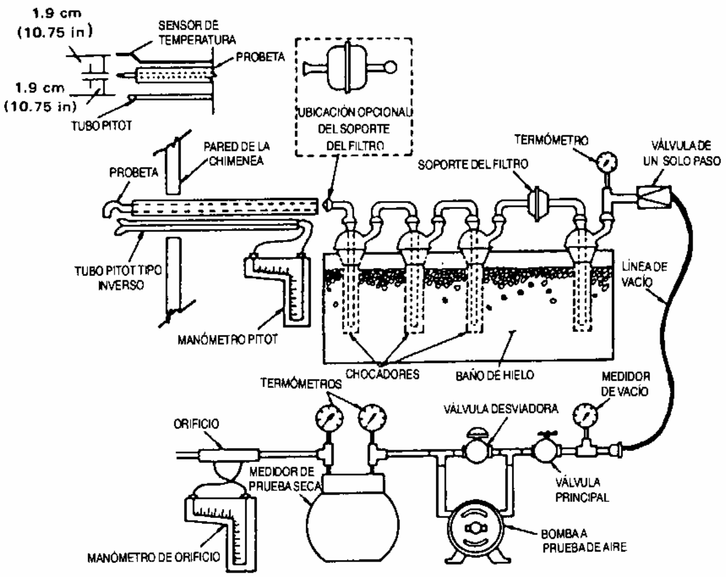


FIG. 26-28 Aparato para el muestreo de fluoruro.

de los compuestos orgánicos gaseosos totales, sin incluir al metano (TGNMO).

El principio en que se basa el Método 23 es una muestra integrada (recolectada en una bolsa) de los gases de la chimenea, que se somete a un análisis cromatográfico de gases, con detección por ionización de llama. El intervalo de este método es de 0.1 a 200 ppm. El límite superior se puede incrementar, al ampliar el intervalo de calibración o mediante dilución de la muestra. En la figura 26-29 aparece un esquema del sistema de muestreo.

El Método 25 se aplica a la medición de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) como orgánicos gaseosos, sin incluir al metano (TGNMO) y los resultados se informan como carbono. La materia orgánica en forma de partícula interfiere con el análisis y, en consecuencia, en algunos casos se requiere un filtro de partículas en la chimenea. El método establece que la toma de la muestra de emisiones se realice a velocidad constante, a través de una trampa de condensado enfriado, por medio de un tanque de muestra al vacío.

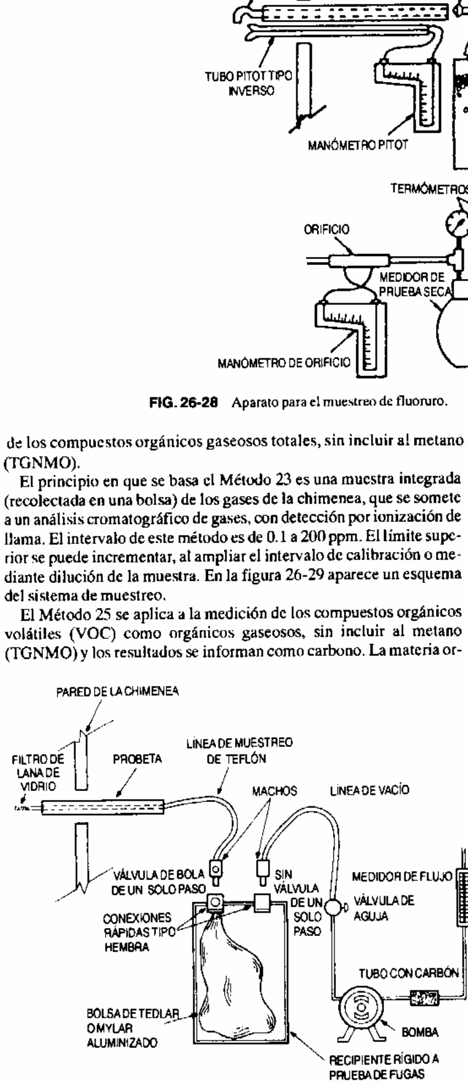


FIG. 26-29 Sistema para el muestreo de compuestos orgánicos e hidrocarburos.

Los compuestos orgánicos gaseosos totales, sin incluir al metano, se determinan por una combinación de los resultados analíticos obtenidos a partir de los análisis independientes de la trampa de condensado y las fracciones del tanque de muestra. Una vez terminado el muestreo, los compuestos orgánicos contenidos en la trampa de condensado se oxidan a bióxido de carbono, que se recolecta en forma cuantitativa en un recipiente al vacío. A continuación, una parte del CO_2 se reduce a metano y se mide con un detector de ionización de llama (FID). El contenido orgánico de la fracción de muestra recolectada en el tanque de muestreo se determina en una columna cromatográfica, para separar los compuestos orgánicos sin metano del monóxido de carbono (CO), el CO_2 y el CH_4; los orgánicos sin metano (NMO) se oxidan a CO_2, se reducen a CH_4 y por último se miden en un detector de ionización de llama. De este modo, la respuesta variable del detector relacionada con los diferentes tipos de compuestos orgánicos queda eliminada.

El sistema de muestreo consta de una trampa de condensado, un sistema de control de flujo y un tanque de muestra (véase la Fig. 26-30). El sistema analítico consta de dos subsistemas principales: uno de oxidación para la recuperación y acondicionamiento de los contenidos en la trampa de condensado y un analizador para compuestos orgánicos sin metano, que consiste en un cromatógrafo de gases con capacidad de retroflujo para el análisis de los orgánicos sin metano y está equipado con catalizadores de oxidación y reducción y un detector de ionización de llama. El sistema para la recuperación y acondicionamiento de los compuestos orgánicos recolectados en la trampa de condensado consta de una fuente de calentamiento, un catalizador de oxidación, un analizador infrarrojo sin dispersión (NDIR) y un recipiente intermedio de recolección.

Opacidad Las determinaciones reales de la velocidad de emisión de partículas producidas por fuentes industriales se dividen en dos ca-

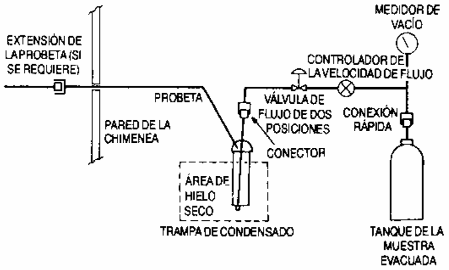


FIG. 26-30 Sistema de muestreo para el Método 25 de EPA.

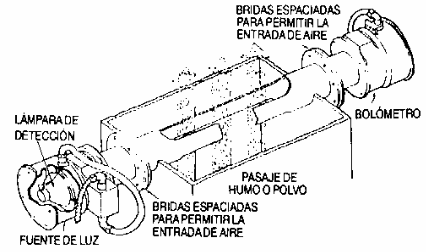


FIG. 26-31 Transmisiómetro de la densidad en la chimenea.

TABLA 26-24 Variables que afectan la opacidad de la pluma

Factores controlables
- Emisión masiva de partículas
- Diámetro medio de la partícula
- Desviación del diámetro medio
- Diámetro de la chimenea
- Temperatura del gas en la chimenea
- Velocidad en la chimenea y otros factores que afectan la dispersión de la pluma

Factores incontrolables relacionados con el tipo de combustible quemado o el proceso correspondiente
- Densidad de la partícula
- Índice de refracción de la partícula
- Vapor de agua
- "Color" de la pluma

Factores incontrolables relacionados con el observador humano, las condiciones del tiempo y el movimiento de la Tierra alrededor del Sol
- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Turbulencia del viento
- Temperatura y humedad del aire ambiente
- "Color" del cielo
- Distancia del observador a la chimenea
- Terreno a desnivel
- Ángulo de compensación del observador
- Hora del día
- Día del año
- Longitud de la chimenea
- Latitud de la chimenea
- Error humano "permitido por EPA"
- Ángulo del Sol

tegorías generales: las mediciones de opacidad y las de masa. Salvo casos muy especiales, no existe correlación aceptada generalmente entre estos dos parámetros.

Las mediciones de opacidad de la chimenea se realizan de acuerdo con el Método 9 de EPA, que implica la observación visual de la pluma según un procedimiento especificado. Además de las emisiones de masa de las partículas existen otras variables que afectan la opacidad. Estas variables se pueden dividir en dos categorías: las que son función del equipo de control, que puede "controlar" el operador o el diseñador, y las que quedan fuera del control del operador (véase la tabla 26-24).

Para ayudar a la cuantificación visual de las mediciones de opacidad, se dispone de varios dispositivos de medición de opacidad (fotómetros). El objetivo básico de estos sistemas es duplicar las lecturas del observador humano entrenado, con la ventaja de que pueden operar las 24 h sin verse afectados por la noche, el mal tiempo, la oscuridad u otras condiciones que afectan adversamente la capacidad visual. Las mediciones de opacidad en la chimenea son muy valiosas cuando las partículas en suspensión son el principal contribuyente de la opacidad. Para obtener mediciones continuas de opacidad, muchas chimeneas están equipadas con medidores de transmisión (fotómetros de transmisión). En la figura 26-31 se muestra una instalación característica. Por lo general, a través de la chimenea se proyecta un rayo de luz o de calor radiante. La intensidad de la radiación que llega al otro lado es proporcional al número y tamaño de las partículas que obstruyen el paso del rayo. Una vez instalada la unidad, se puede calibrar en el sitio, en función de la opacidad de la chimenea, con las observaciones visuales de la chimenea.

MANEJO DEL AGUA DE DESPERDICIO INDUSTRIAL

Referencias Generales: *Manual of Practice: Wastewater Treatment Plant Design*, MOP/8, Water Pollution Control Federation and American Society of Civil Engineers, 1977. Metcalf y Eddy, *Wastewater Enginnering*, McGraw-Hill, New York, 1972.

INTRODUCCIÓN

Todas las operaciones industriales producen agua de desperdicio que es necesario devolver al medio ambiente. Las aguas de desperdicio se pueden clasificar como **1)** aguas de desperdicio doméstico, **2)** aguas de desperdicio del proceso y **3)** aguas de desperdicio de enfriamiento. Las aguas de desperdicio domésticas las producen los obreros de la planta, las instalaciones de duchas y las cafeterías. Las aguas de desperdicio del proceso son resultado de los derrames, fugas y lavado del producto. Las aguas de desperdicio de enfriamiento se producen en los diferentes procesos de enfriamiento, que pueden ser sistemas de un solo paso o sistemas de enfriamiento con recirculación múltiple. Los primeros utilizan grandes volúmenes de agua de enfriamiento, que se usan una sola vez y se devuelven al medio ambiente. Los sistemas de enfriamiento con recirculación múltiple tienen varios tipos de torres de enfriamiento, para enviar el exceso de calor al medio ambiente, y requieren purgas periódicas para evitar el exceso de formación de sales.

Por lo general, las aguas de desperdicio doméstico se manejan mediante el sistema normal de drenaje sanitario, para prevenir la diseminación de microorganismos patógenos, que pueden causar enfermedades. Normalmente, las aguas de desperdicio del proceso no contienen microorganismos patógenos, pero pueden dañar el medio ambiente a través de reacciones químicas directas o indirectas. Algunos desperdicios del proceso son fácilmente biodegradables y crean una demanda inmediata de oxígeno. Otros desperdicios del proceso son tóxicos y representan un peligro directo para la salud de la vida biológica en el medio ambiente. Las aguas de desperdicio de enfriamiento son las me-

nos peligrosas, pero pueden contener aguas de desperdicio del proceso, resultado de fugas en los sistemas de enfriamiento. Las aguas de enfriamiento con recirculación tienden a concentrar contaminantes inorgánicos y orgánicos hasta un punto en que pueden producir daño.

LEYES, REGLAMENTOS Y OFICINAS GUBERNAMENTALES DE ESTADOS UNIDOS

Legislación federal La Public Law (Ley pública) 92-500, promulgada en 1972, es la primera legislación federal que afectó el tratamiento del agua. Gracias a esta ley se creó el National Pollutant Discharge Elimination System (Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes) (NPDES), cuyo objetivo fue la eliminación de todas las descargas de este tipo para 1985. NPDES permitió que el gobierno federal recopilara los datos necesarios para determinar la magnitud del problema de contaminación de las aguas de desperdicio, al requerir que toda empresa tuviera un permiso e informara regularmente a EPA los datos recopilados. La Public Law 95-217 (Clean Water Act de 1977) modificó la Public Law 92-500, al reconocer la necesidad de cambiar el programa de construcción de plantas de tratamiento del agua de desperdicio y recalcar el control de las descargas de materiales tóxicos producidos por las plantas industriales. Para diversas industrias se han desarrollado reglamentos de pretratamiento, con objeto de reducir la separación potencial en las plantas municipales de tratamiento de aguas de desperdicio que reciben desperdicios industriales. En Estados Unidos es práctica común el desarrollo de leyes nuevas cada cinco años.

Environmental Protection Agency (EPA) El presidente Richard Nixon creó EPA en 1970 para coordinar todas las actividades relacionadas con el control de la contaminación del medio ambiente, a nivel federal. La EPA se subordinó directamente a la Oficina del Presidente, para que pudiera responder mejor al proceso político. En la década siguiente, la EPA puso en vigor una serie de reglamentos federales que incrementaban el control federal sobre todas las actividades de control de la contaminación generada por las aguas de desperdicio. En enero de 1981, el presidente Ronald Reagan invirtió la tendencia de una mayor reglamentación federal y comenzó el descenso del papel de la EPA federal.

Oficinas estatales para el control de la contaminación del agua Cada estado tiene su propia oficina para el control de la contaminación del agua. Algunos estados han reorganizado sus oficinas estatales siguiendo los lineamientos de la EPA federal, en tanto que otros han mantenido sus oficinas para el control de la contaminación del agua dentro de los departamentos de salubridad de los estados. Antes de 1965, cada estado controlaba sus propios programas de control de la contaminación del agua. Los conflictos generados entre estados y una observancia forzosa diferente de los reglamentos estatales dieron por resultado que el gobierno federal asumiera el papel directriz. Desafortunadamente, los conflictos entre los estados se transformaron en conflictos entre ellos y la EPA federal. En 1980, las oficinas estatales para el control de la contaminación del agua se encargaban básicamente de manejar la mayor parte del papeleo y las licencias para la EPA, así como de suministrar ayuda técnica a las industrias a nivel local.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE DESPERDICIO

Compuestos orgánicos Los compuestos orgánicos presentes en el agua de desperdicio son los responsables de la mayor parte de los problemas de contaminación, como resultado de su efecto sobre los recursos de oxígeno en el medio ambiente. Los compuestos orgánicos solubles en agua y de bajo peso molecular tienden a biodegradarse por la acción de las bacterias y los hongos, con consumo de oxígeno. A medida que se incrementa la complejidad de las moléculas orgánicas, disminuye su solubilidad y biodegradabilidad. La demanda total de oxígeno químico (COD) de los compuestos orgánicos en las aguas de desperdicio se mide mediante la prueba COD de dicromato. Un reflujo de 2 h, con ácido sulfúrico concentrado y dicromato de potasio con sulfato de plata y sulfato de mercurio como catalizadores, es adecuado para la oxidación completa de todos los compuestos orgánicos, salvo algunos de carácter aromático. En años recientes se desarrolló un aparato de carbón orgánico total (TOC) para obtener una medición TOC similar a la medición COD. Desafortunadamente, los datos del TOC no se han correlacionado con los datos de la COD, salvo para algunos desperdicios industriales. Las mediciones TOC se aplican en industrias que requieren información inmediata de las concentraciones de compuestos orgánicos, principalmente los solubles. La prueba del quinto día para la demanda de oxígeno bioquímico (BOD5) a 20°C ha sido la prueba principal para evaluar la BOD en las aguas de desperdicio. Por desgracia, la prueba BOD5 está sujeta a un error considerable y requiere una evaluación cuidadosa para obtener buenos resultados. Por lo general, los datos de la prueba BOD5 representan aproximadamente el 67% de la última prueba BOD y el 58% de la prueba COD biodegradable. Se han realizado esfuerzos para sustituir la prueba BOD5 por la prueba COD, pero los resultados no han sido satisfactorios. Ambas pruebas se suelen requerir para la evaluación adecuada de la fracción de compuestos orgánicos del agua de desperdicio. Si se utiliza un cultivo microbiano aclimatado a los desperdicios industriales específicos, la prueba BOD5 proporciona una buena medición de la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos, en tanto que la prueba COD proporciona la COD biodegradable y la no biodegradable. Los compuestos orgánicos solubles se metabolizan más fácilmente que los insolubles. Las proteínas y carbohidratos complejos deben hidrolizarse a aminoácidos simples antes del metabolismo. Los hidrocarburos complejos deben metabolizarse por contacto directo con los microbios en la interfase hidrocarburo-agua. Por este motivo, los compuestos orgánicos se analizan por lo general respecto a su equivalencia de oxígeno del medio ambiente. En algunos casos se han utilizado los análisis de compuestos orgánicos, mediante las técnicas de cromatografía de gas (GC) o de espectrometría de masa y cromatografía de gas (GC-MS), para compuestos orgánicos poco comunes.

Compuestos inorgánicos Estos compuestos, presentes en la mayor parte de los desperdicios industriales, son resultado directo de los compuestos inorgánicos existentes en el agua de acarreo. Las fuentes de agua blanda tienen menos compuestos inorgánicos que las fuentes de agua dura o salobre. En algunos casos, los procesos industriales agregan compuestos inorgánicos a las aguas de desperdicio. En tanto que las aguas de desperdicio doméstico presentan un equilibrio entre orgánicos e inorgánicos, muchas aguas de desperdicio de los procesos industriales presentan una deficiencia de compuestos inorgánicos específicos. La biodegradación de los compuestos orgánicos requiere cantidades adecuadas de nitrógeno, fósforo, hierro y rastros de sales. Las sales de amonio o los nitratos pueden proporcionar el nitrógeno, en tanto que los fosfatos suministran el fósforo. Las sales férricas o ferrosas o, incluso, la corrosión normal del acero puede suministrar el hierro necesario. Otras trazas de elementos necesarios para la biodegradación son el potasio, el calcio, el magnesio, el cobalto, el molibdeno, los cloruros y el azufre. El agua de acarreo, las aguas de desperdicio de los desmineralizadores o los productos de la corrosión suministran los rastros de elementos necesarios para un buen metabolismo. En ocasiones es necesario agregar trazas de elementos específicos o elementos nutrientes.

pH y alcalinidad Para que el impacto sobre el medio ambiente sea mínimo, las aguas de desperdicio deben tener valores de pH que varían entre 6 y 9. Si el pH es inferior a 6, el agua de desperdicio tiende a ser corrosiva, como resultado de un exceso de iones de hidrógeno. Por otra parte, al elevarse el pH arriba de 9, algunos iones metálicos se precipitan como carbonatos o hidróxidos. La alcalinidad es importante para mantener los valores del pH en los niveles adecuados. La alcalinidad del bicarbonato es el amortiguador (buffer) principal en las aguas de desperdicio. Es importante mantener una alcalinidad adecuada para neutralizar los componentes ácidos de los desperdicios y los formados por el metabolismo parcial de los compuestos orgánicos. Muchos compuestos orgánicos neutros como, por ejemplo, los carbohidratos,

aldehídos, cetonas y alcoholes se biodegradan en ácidos orgánicos, que deben neutralizarse con la alcalinidad disponible. Si ésta no es adecuada, es mejor agregar carbonato de sodio que cal. La cal es difícil de controlar en forma precisa y da por resultado niveles elevados de pH y precipitación de calcio, que forma parte de la alcalinidad. En algunos casos, el bicarbonato de sodio puede ser la mayor fuente de alcalinidad.

Temperatura La mayor parte de los desperdicios industriales se encuentran en el lado caliente. Si las aguas de desperdicio reciben un tratamiento biológico, una temperatura inferior a 37°C no tiene importancia mayor. Los sistemas biológicos termofílicos para el tratamiento del agua de desperdicio se pueden operar con temperaturas de hasta 65°C, con microbios aclimatados. Las operaciones a baja temperatura en los climas nórdicos dan por resultado temperaturas invernales muy bajas y velocidades lentas de reacción para los sistemas de tratamiento biológicos y químicos. Una viscosidad incrementada en el agua de desperdicio a baja temperatura hace que la separación de sólidos sea más difícil. Por lo general, las temperaturas de operación deben mantenerse, en lo posible, entre 10 y 30°C.

Oxígeno disuelto El oxígeno es un recurso básico del medio ambiente en los lagos y ríos receptores. La vida acuática requiere niveles adecuados de oxígeno disuelto (DO). EPA estableció un nivel mínimo de DO en los ríos de 5 mg/l, durante las operaciones de verano, cuando la velocidad del metabolismo biológico es máxima. Es importante que la descarga del agua de desperdicio tenga niveles máximos de DO y un mínimo de componentes que demandan oxígeno, para que el DO permanezca arriba de 5 mg/l. El oxígeno disuelto es un gas poco soluble en agua, con una solubilidad aproximada de 9.1 mg/l, a 20°C y 101.3 kPa (1 atm) de presión atmosférica. A alturas superiores al nivel del mar, a medida que se incrementa la temperatura y disminuye la presión, se reduce la solubilidad del oxígeno. Por consiguiente, el DO es mínimo cuando las velocidades de demanda de oxígeno bioquímico (BOD) son máximas. Una reducción de la temperatura da por resultado mayores niveles de saturación de DO, pero la velocidad del metabolismo biológico disminuye. Las descargas de agua de desperdicio caliente agravan la situación del oxígeno disuelto en las aguas receptoras.

PRETRATAMIENTO

Muchas corrientes de agua de desperdicio industrial deben pretratarse, antes de descargarlas a los sistemas municipales de drenaje o incluso a un sistema central de drenaje industrial. El pretratamiento de las corrientes individuales debe tenerse en cuenta cuando éstas pueden tener un efecto adverso sobre el sistema total de tratamiento.

Igualación La igualación es uno de los dispositivos de pretratamiento más importante, y la descarga intermitente de desperdicios concentrados es la más adecuada para lograrla. Quizá sea importante igualar los flujos de las aguas de desperdicio o las concentraciones o ambos. Las descargas periódicas de aguas de desperdicio tienden a sobrecargar las unidades de tratamiento. La igualación del flujo hace que se nivelen las cargas hidráulicas en las unidades de tratamiento. Esta igualación puede o no nivelar las variaciones de concentración, dependiendo de la extensión del mezclado en la pileta de igualación. El mezclado mecánico puede ser adecuado si los desperdicios son químicamente puros en su reactividad. Por lo general, los desperdicios biodegradables requieren un mezclado por aereación para que los microbios se mantengan aeróbicos y se eviten los olores desagradables. Los sistemas de aereación difusa ofrecen un mejor mezclado, en condiciones variables de carga, que el equipo mecánico de aireación superficial. Tanto el mezclado como la transferencia de oxígeno son importantes para las aguas de desperdicio biodegradables. La operación en ciclos regulares determinan las dimensiones de la pileta de igualación. No se obtienen ventajas al hacer esta pileta más grande de lo necesario, para nivelar las variaciones del agua de desperdicio. La operación industrial en una semana de 5 días y 40 h hará que una pileta de igualación de 2 días sea bastante grande para la operación continua del sistema de tratamiento de agua, en condiciones uniformes.

Neutralización Las aguas de desperdicio ácidas o básicas deben neutralizarse antes de su descarga. Si la industria produce desperdicios ácidos y básicos, los desperdicios pueden mezclarse juntos, a las velocidades adecuadas, para obtener niveles neutros de pH. Las piletas de igualación se pueden utilizar como piletas de neutralización. Cuando se requiere neutralización química por separado, el hidróxido de sodio es el material básico más fácil de manejar en forma líquida y se puede utilizar a diferentes concentraciones, para una neutralización dentro de la línea, con el mínimo de equipo. Sin embargo, la cal sigue siendo el material básico más común para la neutralización del ácido. La piedra caliza se utiliza cuando las velocidades de reacción son lentas y se dispone de tiempo suficiente para la reacción. Para neutralizar las aguas de desperdicio con pH elevado, se utiliza principalmente ácido sulfúrico, a menos que pueda precipitarse sulfato de calcio, como resultado de la reacción de neutralización. De ser así, se puede utilizar ácido clorhídrico para la neutralización de aguas básicas. Si las aguas de desperdicio son ligeramente básicas, el bióxido de carbono es adecuado para la neutralización.

Eliminación de grasa y aceite La grasa y el aceite tienden a formar capas insolubles con el agua a causa de su carácter hidrofóbico. Estos materiales hidrofóbicos se pueden separar fácilmente de la fase acuosa por gravedad y eliminación de la nata, siempre y cuando no se encuentren bien mezclados con el agua antes de la separación. Si las grasas o aceites forman emulsiones con el agua como resultado de un mezclado turbulento, las emulsiones son difíciles de romper. La separación de la grasa y el aceite debe realizarse cerca del punto donde se mezclan con el agua. En algunos casos, se puede burbujear aire en las mezclas de grasa y aceite para separar por flotación los materiales hidrofóbicos de la fase acuosa. También se han agregado productos químicos para ayudar a romper las emulsiones. La industria petrolera utiliza los separadores del American Petroleum Institute (API) para eliminar los aceites presentes en las aguas de desperdicio. La industria alimentaria emplea trampas de grasa para recolectarla, antes de descargar el agua de desperdicio. Desafortunadamente, las trampas de grasa se diseñan para una limpieza normal de la grasa atrapada. A menudo, se permite que se llenen las trampas y el exceso de grasa se descarga al drenaje, o bien las trampas se limpian con agua caliente o vapor para fluidificar la grasa y facilitar su descarga al drenaje. Las trampas de grasa deben diseñarse para recolectar un volumen específico de grasa en periodos también específicos. En el diseño de la trampa deben adoptarse las precauciones necesarias para que la eliminación de la grasa sea fácil y se pueda manejar en forma adecuada. El empleo de trampas con un diseño inapropiado es peor que no usarlas.

Sustancias tóxicas La legislación federal reciente prohíbe que las industrias descarguen materiales tóxicos en las aguas de desperdicio. A cada industria corresponde determinar si cualquiera de los componentes de sus aguas de desperdicio es tóxico al medio ambiente y debe eliminarla antes de la descarga del agua de desperdicio. La EPA ha señalado varios contaminantes prioritarios que deben eliminarse y mantenerse bajo un control adecuado, desde su origen hasta el punto donde finalmente se colocan. En la actualidad, se ha hecho mayor hincapié en los metales pesados y los compuestos orgánicos complejos implicados en la posible producción de cáncer. Para reducir el contenido de metales pesados y mantenerlos por debajo de los niveles tóxicos y prevenir la descarga de cualquier compuesto orgánico tóxico es esencial el pretratamiento. Afortunadamente, los compuestos orgánicos tóxicos se pueden destruir por medio de varios sistemas de oxidación química. La incineración parece ser el método más económico para destruir los compuestos orgánicos tóxicos. Para que la incineración sea económica, los compuestos orgánicos deben mantenerse separados de las aguas de desperdicio diluidas y tratarse en su forma concentrada. Si no se pueden reutilizar los metales pesados, será necesario concentrarlos y colocarlos dentro de materiales insolubles que no sean permeables a este tipo de metales. Actualmente, las sustancias tóxicas constituyen el mayor desafío para las industrias, ya que en el pasado se prestó muy poca atención a estos materiales.

TRATAMIENTO P

El objetivo del trata
de los contaminante
sión se eliminan me
se manejan como só
Tamices Para la
rado que no se pued
fluido se pueden util
hidrotamices. Gene
cantidad de partícul
para justificar las u
pieza mecánica se
nas industrias utiliz
que puedan dañar o
de las cribas.
Cámaras de aren
tienen arena o partí
arena para obtener
Las cámaras aerea
volumen total basa
Por lo general se uti
que se muestra en l
eliminan por acción
La velocidad de flu
específicas a elimi
aireadas de arena.
para la eliminación
en la superficie de l
blemas. Por lo gene
continuo y se entie

FIG. 26-32 Diagran

Sedimentación
tamente se elimina
mayor parte, estos
ción, la velocidad d
Un tanque de sedim
tor importante que
dráulico de flujo a
de entrada del agua
dan asentar los sólid
se adecuadamente
la máxima eficienci
sedimentado, el efl
rrientes hidráulicas
el proceso de sedim
res de sedimentació
tederos de salida, p
que. Una vez que l
del fondo del tanqu
convencionales de
colectar el sedimen
men excesivo de a

TRATAMIENTO PRIMARIO

El objetivo del tratamiento del agua de desperdicio es la eliminación de los contaminantes con el mínimo esfuerzo. Los sólidos en suspensión se eliminan mediante técnicas de separación físicas o químicas y se manejan como sólidos concentrados.

Tamices Para la eliminación de partículas con un tamaño moderado que no se pueden comprimir fácilmente por la acción del flujo del fluido se pueden utilizar cribas o tamices finos como, por ejemplo, los hidrotamices. Generalmente, los tamices finos se utilizan cuando la cantidad de partículas a eliminar es lo suficientemente grande como para justificar las unidades adicionales. Los tamices finos con limpieza mecánica se emplean para separar partículas grandes. Algunas industrias utilizan cribas de barras para atrapar sólidos grandes que puedan dañar o tapar las bombas y el equipo colocado después de las cribas.

Cámaras de arena Las industrias que en sus aguas de desperdicio tienen arena o partículas inertes duras utilizan cámaras aireadas de arena para obtener una separación rápida de estas partículas inertes. Las cámaras aereadas de arena son relativamente pequeñas, con un volumen total basado en una retención de 3 minutos, a flujo máximo. Por lo general se utiliza aire difuso, para crear el patrón de mezclado que se muestra en la figura 26-32 y las partículas inertes pesadas se eliminan por acción centrífuga y fricción contra las paredes del tanque. La velocidad de flujo del aire se ajusta de acuerdo con las partículas específicas a eliminar. Los sólidos flotables se eliminan en cámaras aireadas de arena. Es necesario proporcionar los medios adecuados para la eliminación normal de los sólidos flotables que se concentran en la superficie de la cámara de arena; de otra manera se generan problemas. Por lo general, la arena asentada se extrae mediante un tornillo continuo y se entierra en un hueco del terreno.

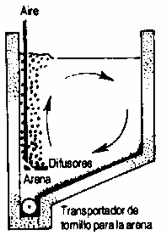


FIG. 26-32 Diagrama esquemático de una cámara de arena aireada.

Sedimentación por gravedad Las partículas que se asientan lentamente se eliminan en tanques de sedimentación por gravedad. En su mayor parte, estos tanques se diseñan con base en el tiempo de retención, la velocidad de sobreflujo superficial y la profundidad mínima. Un tanque de sedimentación puede ser rectangular o circular, y el factor importante que afecta la eficiencia de eliminación es el patrón hidráulico de flujo a través del tanque. La energía contenida en el flujo de entrada del agua de desperdicio debe disiparse antes de que se puedan asentar los sólidos. El flujo del agua de desperdicio debe distribuirse adecuadamente a través del volumen de sedimentación para lograr la máxima eficiencia de sedimentación. Una vez que los sólidos se han sedimentado, el efluente sedimentado debe recolectarse sin crear corrientes hidráulicas importantes, que puedan afectar en forma adversa el proceso de sedimentación. En el extremo de los tanques rectangulares de sedimentación y en la periferia de los circulares se colocan vertederos de salida, para asegurar un flujo uniforme al exterior del tanque. Una vez que los sólidos se han asentado, es necesario extraerlos del fondo del tanque mediante raspado y flujo hidráulico. Los tanques convencionales de sedimentación tienen tolvas de sedimento para recolectar el sedimento concentrado y evitar la eliminación de un volumen excesivo de agua junto con los sólidos asentados. En las figuras

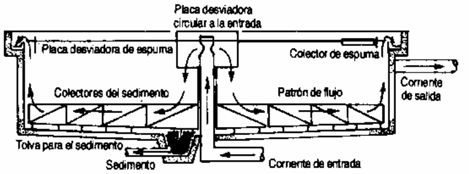


FIG. 26-33 Diagrama esquemático de un tanque circular de sedimentación.

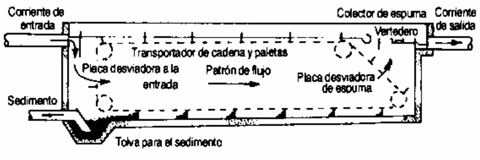


FIG. 26-34 Diagrama esquemático de un tanque rectangular de sedimentación.

26-33 y 26-34 aparecen los diagramas de la sección transversal de los tanques comunes de sedimentación.

Los criterios de diseño para los tanques de sedimentación por gravedad proporcionan por lo general una retención de 2 h, basada en el flujo promedio, con periodos de retención más largos para los sólidos ligeros o inertes, que no cambian durante su retención en el tanque. Deben tomarse las precauciones necesarias para que el tiempo de sedimentación no sea demasiado largo; de otra manera, los sólidos se compactarán densamente, lo que afecta su recolección y eliminación. Por lo general, los sólidos inorgánicos no se compactan más de un 5 a 10%. Los sólidos inorgánicos se compactan hasta 20 o 30%. Las bombas centrífugas pueden manejar lodos con hasta 5 o 6% de sólidos; las de desplazamiento positivo pueden manejar lodos hasta con 10% de sólidos. Cuando se tienen más de 10% de sólidos, los lodos o sedimentos tienden a perder sus propiedades fluidas y deben manejarse como semisólidos y no como fluidos. Los tanques circulares de sedimentación tienen cajas con armadura de acero y raspadores en ángulo, en la parte inferior. El movimiento giratorio de los raspadores de sedimento empuja a los sólidos a las tolvas de recolección, para su eliminación en forma continua o semicontinua. En los tanques rectangulares de sedimentación se utilizan recolectores de cadenas y paletas para el sedimento, o recolectores montados sobre rieles. Cuando en los tanques primarios de sedimentación se presentan sólidos flotables, se montan desnatadores de superficie sobre los raspadores de sedimento para eliminar a intervalos regulares los sólidos superficiales.

Por lo general, la velocidad de sobreflujo superficial (SOR) para la sedimentación primaria se mantiene aproximadamente a 40.74 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [1000 $gal/(ft^2 \cdot día)$], para velocidades de flujo promedio que dependen de las características de los sólidos. La reducción de la SOR a un valor inferior a 40.74 $m^3/(m^2 \cdot día)$ no produce una mejora en la calidad del efluente que sea proporcional a la disminución de la SOR. Generalmente, la profundidad mínima de los tanques de sedimentación es de 3.0 m (10 ft) con tanques circulares de sedimentación cuyo diámetro mínimo es 6.0 m (20 ft) y tanques rectangulares con una razón largo a ancho de 5:1. Las limitaciones de los recolectores de cadena y paletas mantienen el ancho de los tanques rectangulares de sedimentación a incrementos de 6.0 m (20 ft) o menos. A pesar de que las velocidades de sobreflujo hidráulico se han limitado en los vertederos de salida, la experiencia de operación indica que el límite recomendado de 186 $m^3/(m \cdot día)$ [15 000 $gal/(ft \cdot día)$] es más bajo que el necesario para una buena operación. Un tanque circular de sedimentación con el vertedero en una sola orilla proporciona una longitud adecuada del vertedero y es más fácil de ajustar que uno con vertedero en ambos lados. El ajuste inadecuado de los vertederos de salida crea más problemas que una longitud incorrecta de los mismos.

Precipitación química Los sólidos en suspensión con bajo peso y los sólidos coloidales se pueden eliminar por precipitación química y sedimentación por gravedad. En efecto, la precipitación química se utiliza para aglomerar los sólidos pequeños y formar partículas grandes que se asientan rápidamente en los tanques normales de sedimentación. Como coagulante se utiliza el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso, la cal y los polielectrólitos. La selección del coagulante depende de las características químicas de las partículas a eliminar, el pH de las aguas de desperdicio y el costo y disponibilidad de los coagulantes. A pesar de que la reacción de precipitación da por resultado la eliminación de los sólidos en suspensión, también incrementa la cantidad de sedimento a manejar. Para evaluar los sistemas de procesamiento del lodo o sedimento es necesario considerar el sedimento químico junto con las características de los sólidos originales en suspensión.

Normalmente, la precipitación química requiere un sistema de mezclado rápido y un sistema de floculación antes del tanque de sedimentación. Con un tanque rectangular de sedimentación, las unidades de mezclado rápido y sedimentación se colocan antes del tanque. En los tanques circulares, las unidades de mezclado rápido y floculación se incorporan dentro del tanque. En las figuras 26-35 y 26-36 se muestran los diagramas esquemáticos de los sistemas de tratamiento químico. El diseño de los mezcladores rápidos proporciona una retención de 30 s, a flujo promedio, con una turbulencia suficiente para mezclar los productos químicos con las aguas de desperdicio que se introducen. Las unidades de floculación se diseñan para un mezclado lento, con una retención de 20 minutos. Estas unidades se diseñan para hacer que las partículas choquen e incrementen su tamaño sin fracturas excesivas. Deben tomarse las precauciones necesarias para el paso de la mezcla floculada de la unidad de floculación a la unidad de sedimentación, sin romper las partículas grandes.

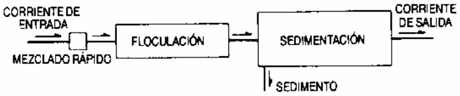


FIG. 26-35 Diagrama esquemático de un sistema de precipitación química para tanques rectangulares de sedimentación.

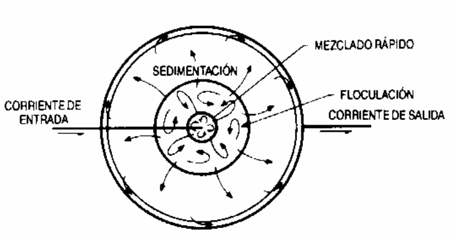


FIG. 26-36 Diagrama esquemático de un sistema de precipitación química para tanques circulares de sedimentación.

TRATAMIENTO SECUNDARIO

Conceptos del tratamiento biológico El tratamiento secundario está diseñado para eliminar los compuestos orgánicos solubles y coloidales por medio del metabolismo de los microbios. Los sistemas de tratamientos biológicos convierten los compuestos orgánicos biodegradables en solución en compuestos orgánicos en suspensión, que al ser floculados se eliminan al sedimentarse por gravedad. Los sólidos coloidales tienden a adsorberse en los flóculos microbianos.

Los sistemas biológicos para el tratamiento de las aguas de desperdicio utilizan bacterias como microorganismos principalmente responsables de la eliminación del exceso de bacterias y de la producción de un efluente claro. Las bacterias tienen un diámetro promedio de 0.5 a 1.0 μm y una longitud de 1.0 a 2.0 μm. El tamaño de los protozoarios varía entre 10 y varios cientos de micrómetros. Las bacterias no pueden metabolizar los sólidos orgánicos, pero convierten las partículas sólidas en compuestos orgánicos solubles antes del metabolismo. Afortunadamente, las bacterias tienen enzimas en su superficie celular, que pueden hidrolizar los compuestos orgánicos complejos y convertirlos en moléculas orgánicas simples. Las bacterias se distribuyen en todo el medio ambiente con diferentes características bioquímicas. La tierra es la mejor fuente de microbios concentrados, porque las bacterias existentes en la tierra son responsables de la estabilización de los materiales de desperdicio que en ella se encuentran. Por lo general, las bacterias requeridas se extraen de la tierra y se cultivan en las aguas de desperdicio, hasta obtener un número suficiente para las reacciones deseadas. A pesar de que se pueden comprar bacterias especializadas, normalmente no es necesario hacerlo, ya que la tierra suministra los microorganismos deseados en forma más económica.

Para que las bacterias puedan crecer, deben tener un medio ambiente adecuado con todos los nutrientes necesarios. El medio ambiente debe proporcionar un buen mezclado para lograr un contacto adecuado entre los microorganismos y los contaminantes a metabolizar. Este medio ambiente puede ser aeróbico, con un exceso de oxígeno disuelto, o anaeróbicos, sin ningún oxígeno. Para un buen crecimiento, debe haber suficiente nitrógeno, fósforo, hierro y trazas de otros metales, pero la concentración de metales pesados no debe ser demasiado elevada, porque sería tóxica. El pH debe mantenerse entre 6 y 9. La temperatura debe estar entre 5 y 35°C; sin embargo, los sistemas termofílicos pueden operarse hasta 65°C. Si el medio ambiente no está equilibrado, se obtiene un crecimiento inadecuado de los microbios y el tratamiento será deficiente. Uno de los principales problemas se presenta con los microbios filamentosos, que afectan adversamente la floculación y la sedimentación. En ausencia de oxígeno y hierro adecuados, las bacterias filamentosas pueden predominar sobre las normales. En condiciones de pH bajo y poco contenido de nitrógeno o desperdicios con altas concentraciones de carbohidratos, los hongos filamentosos predominan sobre las bacterias.

En condiciones aeróbicas se obtiene la mejor calidad del efluente. Las bacterias metabolizan los compuestos orgánicos biodegradables, al utilizar el oxígeno disuelto como su aceptor terminal de electrones. Aproximadamente una tercera parte de los compuestos orgánicos metabolizados se convierten, por oxidación, en bióxido de carbono y agua, con objeto de obtener la energía necesaria para transformar las dos terceras partes restantes en protoplasma microbiano. Este protoplasma es similar, independientemente de las especies de bacterias o los compuestos orgánicos que se metabolizan. Los análisis químicos indican que el protoplasma microbiano contiene 90% de compuestos orgánicos y 10% de inorgánicos; la fracción orgánica contiene aproximadamente 50% de C, 7% de H, 31% de O y 12% de N en peso. El principal problema del tratamiento aeróbico es el gran volumen de sólidos microbianos a procesar. El protoplasma de los microbios no es estable, sino que sigue degradándose con el tiempo en un proceso conocido como "respiración endógena". Aproximadamente el 80% del protoplasma microbiano se puede oxidar, pero en el tratamiento aeróbico, el 20% de la fracción orgánica es estable y debe someterse a un tratamiento posterior.

En ausencia de oxígeno disuelto, las bacterias deben encontrar otro aceptor de electrones. En condiciones anaeróbicas, el oxígeno enlazado químicamente es el principal aceptor de electrones. Los nitratos, los nitritos, los sulfatos, el bióxido de carbono y los compuestos orgánicos oxigenados se utilizan como aceptores de electrones. Los nitratos se reducen a nitritos y a varios compuestos intermedios antes de reducirse a nitrógeno gaseoso. Es importante tener en cuenta que la desnitrificación da por resultado la producción de nitrógeno gaseoso, que es insoluble en las aguas de desperdicio, y no la producción de amoniaco o iones de amonio. Si los nitratos se requieren como fuente de nitrógeno para las bacterias, se reducirán a iones amonio en proporción a las necesidades de nitrógeno para el protoplasma. Un grupo especial de bacterias utiliza los sulfatos como aceptor de electrones y puede producir tiosulfatos, azufre libre o sulfuro de hidrógeno. Las bacterias forma-

doras de metano pueden reducir el bióxido de carbono y producir metano, que es relativamente insoluble en el agua y se utiliza como fuente de energía. Los compuestos orgánicos oxigenados, como los carbohidratos, se degradan a ácidos orgánicos simples, aldehídos, cetonas y alcoholes, que las bacterias formadoras de metano metabolizan y producen metano y bióxido de carbono. Ya que se requiere la misma cantidad de energía para producir una unidad de protoplasma microbiano en forma aeróbica y anaeróbica, se obtendrá menos masa celular microbiana por unidad de contaminantes orgánicos al metabolizarlos anaeróbicamente, en comparación con la metabolización aeróbica. Las reacciones anaeróbicas no dan tanta energía a los microbios como las aeróbicas. Los productos anaeróbicos finales contienen mucha energía de la cual no pueden disponer los microbios. Las investigaciones actuales sobre los sistemas anaeróbicos para el tratamiento de las aguas de desperdicio están estimuladas por la producción de metano, que puede utilizarse como fuente de energía, y por la menor producción de sólidos microbianos. Aproximadamente 80 a 95% de los compuestos orgánicos se pueden convertir en metano y bióxido de carbono, con una conversión de 5 a 20% en sólidos microbianos.

El tiempo es una variable fundamental para el cálculo de las dimensiones de los sistemas de tratamiento de aguas de desperdicio. Para metabolizar una cantidad determinada de materia orgánica mediante una unidad de masa celular se requiere un periodo de tiempo definido. Al retener los microbios en el sistema de tratamiento se reduce el tiempo de tratamiento por unidad de materia orgánica. Desafortunadamente, el tiempo para el tratamiento aeróbico se controla mediante la transferencia de oxígeno. En condiciones anaeróbicas, el contacto entre los microbios y los contaminantes orgánicos controla el tiempo total de la reacción. Con un diseño adecuado se puede tratar más materia orgánica en forma anaeróbica que aeróbica, en el mismo periodo. Por desgracia, el sistema anaeróbico no puede producir un efluente de calidad tan elevada como lo produce el sistema aeróbico. El resultado total es que, a menudo, los sistemas anaeróbicos se utilizan como la primera etapa del tratamiento biológico y los aeróbicos constituyen la segunda etapa.

Lagunas Las lagunas son sistemas para el tratamiento de las aguas de desperdicio capaces de producir un efluente satisfactorio a bajo costo y con facilidad de operación.

Lagunas facultativas Estas lagunas se establecen para utilizar reacciones anaeróbicas y aeróbicas. Por lo general, las lagunas facultativas constan de dos o más celdas en serie. Los sólidos sedimentables tienden a asentarse en la primera celda y sufren un metabolismo anaeróbico, con la producción de ácidos orgánicos y metano gaseoso, que burbujea a la atmósfera. Las algas en la superficie de la laguna utilizan la luz del Sol como energía para convertir el bióxido de carbono, agua y los iones amonio en su protoplasma, con la liberación de oxígeno como producto de desperdicio. Las bacterias aeróbicas utilizan el oxígeno liberado por las algas para estabilizar los compuestos orgánicos solubles y coloidales. Por consiguiente, las bacterias y algas forman una relación simbiótica, como se aprecia en la figura 26-37. El aspecto interesante de las lagunas facultativas es que la materia orgánica presente en las aguas de desperdicio de entrada no se estabiliza, sino que se convierte en protoplasma microbiano, cuya velocidad de demanda

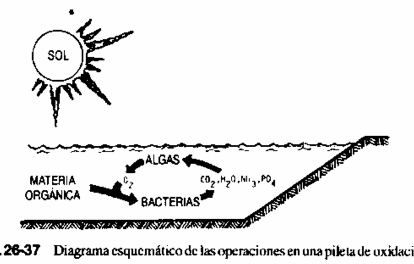


FIG. 26-37 Diagrama esquemático de las operaciones en una pileta de oxidación.

de oxígeno es menor. De hecho, en algunas lagunas facultativas los compuestos inorgánicos de las aguas de desperdicio se convierten en orgánicos, con el incremento total de estos compuestos en el sistema de la laguna.

Las lagunas facultativas se diseñan con base en la carga orgánica, relacionada con la disponibilidad potencial de luz solar. En la parte norte de Estados Unidos, las lagunas facultativas se proyectan sobre la base de 2.2 g/(m^2·día) [20 lb BOD5/(acre·día)]. En la parte media de este país, la carga orgánica se puede incrementar hasta un nivel de 3.4 a 4.5 g/(m^2·día) [30 a 40 lb BOD5/(acre·día)], en tanto que en la parte sur la carga orgánica se puede incrementar a 6.7 g/(m^2·día) [60 lb BOD5/(acre·día)]. Generalmente, la profundidad de la laguna se mantiene entre 1.0 y 1.7 m (3 a 5 ft). Una profundidad inferior a 1.0 m (3 ft) favorece el crecimiento de plantas acuáticas y permite la cría de mosquitos. En áreas secas, la profundidad máxima se puede incrementar arriba de 1.7 m (5 ft), dependiendo de la evaporación. El mezclado en la mayor parte de las lagunas facultativas depende de la acción natural del viento y, en consecuencia, las lagunas no deben colocarse en áreas donde esta acción se vea limitada.

La calidad del efluente que procede de las lagunas facultativas está relacionada básicamente con los sólidos en suspensión producidos por los microbios vivos y muertos. Un tiempo de retención largo en las lagunas permite que los microbios se mueran y dejen una partícula pequeña, que se asienta lentamente. Los nutrientes liberados por la muerte de los microbios permite que las algas sobrevivan mediante la recirculación de los nutrientes. Por consiguiente, las algas determinan la calidad final del efluente. El empleo de una serie de estanques con estructuras de transferencia bien diseñadas entre ellas permite la máxima retención de las algas dentro de los estanques, con lo que se obtiene un efluente de la mejor calidad. Por lo general, la BOD5 soluble es de 5 a 10 mg/l, con una BOD5 total del efluente inferior a 30 mg/l. Los sólidos en suspensión del efluente varían considerablemente con las estaciones del año; en los meses de verano dichos sólidos llegan a un máximo de 70 a 100 mg/l, en tanto que en invierno presentan un mínimo de 10 a 20 mg/l. Si la eliminación de los sólidos suspendidos es esencial, el mejor método disponible hasta el momento es la precipitación química. Los filtros lentos de arena y los de roca se pueden utilizar para la eliminación de los sólidos en suspensión, siempre y cuando la concentración de estos sólidos en el efluente sea relativamente baja, 40 a 70 mg/l.

Lagunas aireadas Estas lagunas se originaron para controlar las lagunas facultativas sobrecargadas. Ya que las lagunas presentan una deficiencia de oxígeno, se suministra más oxígeno por medio de aireadores mecánicos de superficie o mediante aireadores por difusión. Los primeros tuvieron una aceptación rápida porque podían agregarse rápidamente a los estanques existentes y trasladarse a puntos estratégicos. Desafortunadamente, las unidades de aireación superficial por flotación y de alta velocidad no fueron eficientes y se requirió gran número de ellas para las lagunas existentes. El problema fue que producían un mezclado deficiente en lagunas poco profundas.

Con el tiempo se agregó equipo de aireación por difusión en lagunas relativamente profundas [3.0 a 6.0 m (10 a 20 ft)], y el mezclado se convirtió en el parámetro más importante para una buena transferencia de oxígeno en las lagunas aireadas. Desde el punto de vista económico se descubrió que una laguna aireada y totalmente mezclada con una retención de 24 h proporcionaba el mejor equilibrio entre el mezclado y la transferencia de oxígeno. A medida que se incrementa la carga orgánica, también aumenta el tiempo de retención del fluido. La aireación a corto plazo permite que las bacterias metabolicen los compuestos orgánicos solubles, pero el tiempo no permite el metabolismo de los sólidos en suspensión, que se combinan con los sólidos microbianos producidos por el metabolismo y salen de la laguna aireada al estanque de separación de sólidos. Datos obtenidos de lagunas aireadas a corto plazo indican que ocurre un 50% de estabilización de la BOD5, con la conversión de los compuestos orgánicos solubles en células microbianas; en consecuencia, el problema fue la separación y estabilización de estas células. Los estanques de sedimentación a corto plazo permiten la separación de los sólidos sin un crecimiento significativo

de las algas, pero requieren limpiezas con intervalos frecuentes para evitar que se llenen con sólidos y éstos fluyan junto con el efluente. Las lagunas a largo plazo permiten la separación y estabilización de los sólidos, pero también favorecen el crecimiento de las algas, que afecta la calidad del efluente.

Las lagunas aireadas son simplemente reactores que dispersan microbios y permiten la conversión de los componentes orgánicos, presentes en las aguas de desperdicio, en sólidos microbianos, sin estabilización. Los compuestos orgánicos residuales en solución son muy bajos, inferiores a 5 mg/l de la BOD5. Al agregar oxígeno y mejorar el mezclado, se acelera la reacción del metabolismo microbiano, pero la estabilización de los sólidos microbianos es aún un problema por resolver.

Lagunas anaeróbicas Estas lagunas se desarrollaron para el tratamiento de las aguas de desperdicio en las que una fracción importante de los contaminantes orgánicos está constituida por sólidos en suspensión, que pueden eliminarse fácilmente por sedimentación por gravedad. Las lagunas anaeróbicas son relativamente profundas [3.0 a 6.0 m (10 a 20 ft)], con un tiempo corto de retención del fluido (3 a 5 días) y una velocidad elevada de carga de la BOD5, hasta de 3.2 kg/(m^3·día) [200 lb/(1000 ft^3·día)]. El metabolismo microbiano en la capa asentada de sólidos produce metano y bióxido de carbono, que suben rápidamente a la superficie y acarrean parte de los sólidos en suspensión. En las lagunas anaeróbicas se produce rápidamente una capa de espuma o impurezas que retrasa la transferencia de oxígeno y la liberación de gases detestables. El mezclado con una bomba de molienda puede proporcionar un mejor medio ambiente para el metabolismo de los sólidos en suspensión. El factor clave de las lagunas anaeróbicas es un amortiguador adecuado que mantenga el pH entre 6.5 y 8.0. Las lagunas anaeróbicas son específicas para el tratamiento de desperdicios contaminantes ricos en proteínas, ya que los iones amonio reaccionan con el bióxido de carbono y el agua para formar bicarbonato de amonio como amortiguador principal. Los desperdicios con alto contenido de carbohidratos no deben tratarse en lagunas anaeróbicas sin un amortiguador adecuado, porque producen ácidos orgánicos, lo que dificulta el mantenimiento de un pH que permita el buen crecimiento de los microbios.

Las lagunas anaeróbicas no producen un efluente de alta calidad, pero pueden reducir la carga de la BOD en un 80 a 90%, con un mínimo de esfuerzo. Puesto que las lagunas anaeróbicas trabajan mejor con desperdicios orgánicos concentrados, su efluente debe tratarse mediante lagunas aireadas o facultativas. Las lagunas anaeróbicas constituyen la primera etapa para el tratamiento de aguas de desperdicio concentradas con compuestos orgánicos.

Filtros de goteo Durante años, los filtros de goteo fueron el pilar de los sistemas biológicos para el tratamiento de las aguas de desperdicio, por su sencillez de diseño y operación. Estos filtros fueron desplazados como el principal sistema de tratamiento biológico por el sedimento activado, debido a que este último produce una mejor calidad de efluente. Los filtros de goteo son simplemente reactores biológicos con un medio fijo, en los cuales las aguas de desperdicio se diseminan sobre la superficie de un medio sólido donde crecen los microbios, que eliminan los compuestos orgánicos de las aguas de desperdicio que fluyen sobre el medio fijo. El oxígeno del aire permite que ocurran reacciones aeróbicas en la superficie de la capa microbiana, pero en el fondo de esta capa, donde el oxígeno no penetra, tiene lugar un metabolismo anaeróbico.

Originalmente, el medio en los filtros de goteo fue de roca, pero en la actualidad se ha reemplazado por plástico, que proporciona un mayor espacio vacío por unidad de área superficial y ocupa menos volumen dentro del filtro. El medio de plástico permite que en los filtros de goteo la profundidad del medio se incremente de 1.8 m (6 ft) a 4.2 m (14 ft) o, incluso, hasta 6.0 m (20 ft). Por lo general, las aguas de desperdicio se introducen por medio de un distribuidor giratorio o una tobera de rocío fijo. El rocío o la descarga de las aguas de desperdicio por encima del medio del filtro de goteo permite una mejor distribución sobre el medio y la transferencia de oxígeno antes de llegar al medio. El efluente que sale del medio del filtro se recolecta en un sistema de subdrenaje de arcilla y porcelana o en un tanque colocado debajo del medio de plástico. Es importante que el fondo del filtro de goteo esté abierto al aire, para que éste circule rápidamente a través del filtro y lleve el oxígeno necesario para las reacciones microbianas.

Si se requiere un efluente de alta calidad, los filtros de goteo deben operarse a bajas velocidades de carga hidráulica y de carga orgánica. Los filtros de goteo con baja velocidad se operan con cargas hidráulicas que varían entre 2.2×10^{-5} y 4.3×10^{-5} m^3/(m^2·s) [2 a 4 millones de gal/(acre·día)]. Los filtros de goteo con alta velocidad están diseñados para operar con cargas hidráulicas que varían entre 10.8×10^{-5} y 40.3×10^{-5} m^3/m^2·s) [10 a 40 millones de gal/(acre·día)] y cargas orgánicas hasta de 1.4 kg/(m^3·día) [90 lb BOD5/(1000 ft^3·día)]. Los filtros de goteo con medio de plástico se han diseñado para operar con cargas hidráulicas hasta de 108×10^{-5} m^3/(m^2·s) [100 millones de gal/(acre·día)] o incluso más elevadas, y cargas orgánicas hasta de 4.8 kg/(m^3·día) [300 lb BOD5/(1000 ft^3·día)]. Los filtros de goteo de baja velocidad producen reducciones mayores a 90% de la BOD5 y los sólidos en suspensión, en tanto que los de alta velocidad producen una reducción de 65 a 75% de la BOD5. Los filtros de goteo con medio de plástico producen una reducción de 59 a 85% de la BOD5, que depende de la velocidad de carga orgánica. Es importante reconocer que los desperdicios industriales concentrados requieren mayor recirculación hidráulica alrededor de los filtros de goteo para obtener la velocidad adecuada de carga hidráulica sin cargas orgánicas excesivas. Con altas velocidades de recirculación, la carga orgánica se distribuye sobre todo el volumen del filtro de goteo, para una eliminación orgánica máxima. Un tiempo corto de retención del fluido, dentro del filtro de goteo es la causa principal de una eficiencia mala del ratamiento.

Contactores biológicos giratorios (RBC) Lo último en filtros de goteo son los contactores biológicos giratorios con una serie de discos circulares de plástico, cuyo diámetro varía entre 3.0 y 3.6 m (10 a 12 ft), sumergidos hasta aproximadamente 40% del diámetro dentro del tanque de contacto. Los discos RBC giran a una velocidad que varía entre 2 y 5 rpm. A medida que los discos se desplazan a través de las aguas de desperdicio, se les adhiere una pequeña capa. Cuando los discos salen a la atmósfera, los microbios sobre la superficie del disco oxidan los compuestos orgánicos; por consiguiente, sólo se requiere una pequeña cantidad de energía para suministrar el oxígeno necesario para el tratamiento del agua de desperdicio. A medida que los microbios se acumulan sobre los discos de plástico, la velocidad de corte creada por el movimiento de los discos a través del agua hace que el exceso de microbios se elimine de los discos y descargue en el tanque final de sedimentación.

Los contactores biológicos giratorios son muy populares para el tratamiento de los desperdicios industriales, por su tamaño relativamente pequeño y los bajos requerimientos de energía. Por desgracia, han ocurrido varios problemas que es necesario reconocer antes de utilizar los RBC. Los desperdicios industriales concentrados tienden a crear crecimientos excesivos de microbios que no se cortan fácilmente y producen velocidades elevadas de demanda de oxígeno, con la generación de sulfuro de hidrógeno y olores desagradables. Los crecimientos microbianos altos han dañado algunos de los discos y causado fallas de los ejes. En la actualidad, los discos se recubren con cubiertas de plástico para prevenir la ocurrencia de olores molestos. En los sistemas cubiertos de RBC es necesario forzar el paso del aire a través de las unidades y el aire debe tratarse químicamente antes de descargarlo al medio ambiente. La recirculación del flujo del agua de desperdicio alrededor de las unidades de RBC puede distribuir la carga en todas las unidades y reducir los crecimientos microbianos iniciales altos. Las unidades de RBC también trabajan mejor con cargas orgánicas uniformes que requieren tanques de oleaje para muchos desperdicios industriales. El resultado neto ha sido que el costo de las unidades RBC se aproxima al de otras unidades de tratamiento, en términos de la materia orgánica estabilizada.

Los contactores biológicos giratorios deben diseñarse con base en las velocidades de carga hidráulica y orgánica. Por lo general, las velocidades de carga hidráulica son hasta de 0.16 m^3/(m^2·día) [4 gal/(ft^2·día)] de área superficial y velocidades de carga orgánica hasta

de 44 kg/(m^2·día) [9
depende, básicamen
cidad de carga orgá
locidad, las unidad
producen nitrificaci
Sedimento activ
tamiento biológico
alta calidad del eflu
el sedimento activa
este sistema. No ha
considerable, pero
sin consumir cierta
serva los sistemas d
vel de tratamiento c
Modificaciones
activado ofrecen un
ma más popular pa
activado con mezcl
variaciones de carg
contacto es una mo
el más adecuado pa
do de sólidos en sus
nicos solubles. La
mezclado a corto pl
tabolizar los compu
ción para la separa
la estabilización de
dad, los sistemas de
vado con mezclado
periodos de aireaci
altamente mezclad
de los compuestos
tivado, en el mism
forma popular del
aireación mecánica
tar desperdicios in
mezclado total que
Una de las últimas
utiliza carbón activ
cos complejos y ay
cación se utilizan f
fornia antes del tan
licor mezclado so
proporcionar un c
pino y en el tanque
gramas esquemáti
sedimento activad
En cada proceso
de aireación para l
de los componente
que de sedimentac
los sólidos se recir
como simiente par
lidos que los que se
deben desecharse
Los sistemas de ai
sólidos que los sist
Sistemas de ai
tanques de aireaci
cipales: el mezcla
aireación difusa se
velocidad constan
ajustar con facilid
instalan a lo largo
diseminan en todo
buja fina o gruesa.
cia de oxígeno, p
aire con objeto de

tanque colocado de-
l fondo del filtro de
damente a través del
ınes microbianas.
ltros de goteo deben
y de carga orgánica.
con cargas hidráuli-
n^2·s) [2 a 4 millones
ocidad están diseña-
ı entre 10.8 × 10^{-5} y
re·día)] y cargas or-
)00 ft^3·día)]. Los fil-
ado para operar con
s) [100 millones de
rgánicas hasta de 4.8
tros de goteo de baja
de la BOD5 y los só-
cidad producen una
goteo con medio de
la BOD5, que depen-
te reconocer que los
mayor recirculación
obtener la velocidad
excesivas. Con altas
distribuye sobre to-
nación orgánica má-
entro del filtro de go-
el ratamiento.
o último en filtros de
n una serie de discos
3.0 y 3.6 m (10 a 12
l diámetro dentro del
ı velocidad que varía
lazan a través de las
capa. Cuando los dis-
ı superficie del disco
nte, sólo se requiere
el oxígeno necesario
edida que los micro-
la velocidad de corte
del agua hace que el
escargue en el tanque

populares para el tra-
tamaño relativamente
or desgracia, han ocu-
er antes de utilizar los
os tienden a crear cre-
tan fácilmente y pro-
eno, con la generación
Los crecimientos mi-
os y causado fallas de
con cubiertas de plás-
stos. En los sistemas
el aire a través de las
ntes de descargarlo al
l agua de desperdicio
ir la carga en todas las
os iniciales altos. Las
rgas orgánicas unifor-
os desperdicios indus-
las unidades RBC se
términos de la materia

diseñarse con base en
Por lo general, las ve-
0.16 $m^3/(m^2 \cdot$día) [4
e carga orgánica hasta

de 44 kg/(m^2·día) [9 lb BOD5/(ft^2·día)]. La eficiencia del tratamiento depende, básicamente, del tiempo de retención del fluido y de la velocidad de carga orgánica. Al igual que los filtros de goteo con baja velocidad, las unidades RBC con bajas velocidades de carga orgánica producen nitrificación.

Sedimento activado El sedimento o lodo activado ha sido el tratamiento biológico para aguas de desperdicio más difundido, por la alta calidad del efluente. Los elevados requerimientos de energía para el sedimento activado hacen que se cuestione el empleo continuo de este sistema. No hay duda de que este tratamiento consume energía considerable, pero no existe manera de tratar las aguas de desperdicio sin consumir cierta cantidad definida de energía. Deben verse con reserva los sistemas de sedimento activado que proporcionan un alto nivel de tratamiento con un consumo mínimo de energía.

Modificaciones Las modificaciones de los sistemas de sedimento activado ofrecen una selección considerable en los procesos. El sistema más popular para los desperdicios industriales es el de sedimento activado con mezclado total, por su capacidad de absorber mejor las variaciones de carga que otras modificaciones. La estabilización por contacto es una modificación al tratamiento con lodo activado, que es el más adecuado para las aguas de desperdicio que tienen alto contenido de sólidos en suspensión y baja concentración de compuestos orgánicos solubles. La estabilización por contacto utiliza un tanque de mezclado a corto plazo, para adsorber los sólidos en suspensión y metabolizar los compuestos orgánicos solubles, un tanque de sedimentación para la separación de los sólidos y un tanque de reaireación para la estabilización de los compuestos orgánicos en suspensión. En realidad, los sistemas de aireación extensa son sistemas de sedimento activado con mezclado total y aireación a largo plazo. En ellos se utilizan periodos de aireación de 24 a 48 h y los sólidos suspendidos en un licor altamente mezclado, para proporcionar una estabilización completa de los compuestos orgánicos y la digestión aerobia del sedimento activado, en el mismo tanque de aireación. El dique de oxidación es otra forma popular del sistema de aireación extensa, en el cual se utiliza aireación mecánica. Los sistemas de oxígeno puro se diseñan para tratar desperdicios industriales concentrados, en unidades en serie con mezclado total que tienen periodos de contacto relativamente cortos. Una de las últimas modificaciones al sistema de sedimento activado utiliza carbón activado en polvo para adsorber los compuestos orgánicos complejos y ayudar a la separación de los sólidos. En otra modificación se utilizan filtros de goteo con medio de pino gigante de California antes del tanque de aireación a corto plazo, con recirculación del licor mezclado sobre la torre empacada con el medio de pino, para proporcionar un crecimiento considerable de los microbios sobre el pino y en el tanque de aireación. En la figura 26-38 aparecen los diagramas esquemáticos de las diferentes modificaciones al sistema de sedimento activado.

En cada proceso de lodo o sedimento activado se utiliza un tanque de aireación para la estabilización del desperdicio, con la conversión de los componentes orgánicos a sólidos microbianos nuevos y un tanque de sedimentación para la separación de los sólidos. Por lo general, los sólidos se recirculan del tanque de sedimentación al de aireación, como simiente para los microorganismos. Ya que se producen más sólidos que los que se pueden oxidar, siempre existen algunos sólidos que deben desecharse continuamente del sistema de sedimento activado. Los sistemas de aireación a corto plazo requieren un desecho mayor de sólidos que los sistemas a largo plazo.

Sistemas de aireación Estos sistemas controlan el diseño de los tanques de aireación. El equipo de aireación tiene dos funciones principales: el mezclado y la transferencia de oxígeno. En los equipos de aireación difusa se utiliza un soplador de desplazamiento positivo, con velocidad constante, o un soplador de turbina y alta velocidad, para ajustar con facilidad los volúmenes de aire. Los difusores de aire se instalan a lo largo de uno de los lados del tanque de aireación, o se diseminan en todo el fondo del tanque y pueden ser difusores de burbuja fina o gruesa. Los primeros son más eficientes para la transferencia de oxígeno, pero requieren un equipo mayor para la limpieza del aire con objeto de impedir que se tapen con las impurezas del aire. El equipo de aireación superficial mecánica es más eficiente que el de aireación difusa, pero no tan flexible. Los factores económicos han dictaminado el empleo de aireadores de gran potencia, pero la configuración del tanque favorece el uso de un número mayor de aireadores de potencia menor. En los diques de oxidación se utilizan aireadores horizontales tipo rotor. El problema básico en los aireadores superficiales mecánicos es el mezclado, porque son una bomba de suministro puntual con capacidad limitada. La experiencia ha demostrado que los cojinetes son el problema más grave del equipo de aireación mecánica. La acción del oleaje generado en el tanque de aireación tiende a producir esfuerzos laterales sobre los cojinetes, que dan por resultado fallas y mayores costos de mantenimiento. Las unidades de aireación superficial mecánica a baja velocidad presentan menos problemas que los equipos de alta velocidad. Los tanques con una profundidad superior a 3 m (10 ft) requieren tubos de arrastre para asegurar un flujo hidráulico adecuado en el tanque de aireación. El cortocircuito es uno de los principales problemas del equipo de aireación mecánica. La combinación de los sistemas de aireación mecánica y por difusión goza de popularidad en los tratamientos de desperdicios industriales con cargas orgánicas variables. Los mezcladores mecánicos proporcionan el mezclado del fluido, con aireación difusa variable para las diferentes velocidades de transferencia de oxígeno.

Los sistemas de aireación difusa transfieren de 20 a 40 mg/(l de O_2·h). Los sistemas de aireación combinada antes mencionados pueden transferir hasta 65 mg/(l de O_2·h), en tanto que los aireadores superficiales mecánicos proporcionan hasta 90 mg/(l de O_2·h). Los sistemas de oxígeno puro suministran la velocidad máxima de transferencia de oxígeno, hasta 150 mg/(l de O_2·h). El equipo de aireación debe proporcionar el oxígeno suficiente para cubrir la demanda máxima de oxígeno, de otra manera el sistema no suministrará el tratamiento adecuado. Por este motivo, la demanda máxima de oxígeno y la velocidad de transferencia para el equipo deseado determinan las dimensiones del tanque de aireación en términos del tiempo de retención. Los aspectos económicos establecen el equilibrio que existe entre el tamaño del tanque de aireación y las dimensiones del equipo de aireación. A medida que el costo de la potencia se incrementa, las consideraciones económicas favorecerán la construcción de un tanque de aireación más grande y aireadores más pequeños. También es igualmente importante examinar el patrón de flujo hidráulico alrededor de cada aireador, para asegurar la eficiencia máxima de transferencia de oxígeno. Un espaciamiento inadecuado del equipo de aireación puede llevar al desperdicio de energía.

No existe una forma o tamaño estándar del tanque de aireación pues pueden ser circulares, cuadrados o rectangulares. Los tanques poco profundos presentan más problemas de mezclado que los profundos. Con todo, la profundidad de los tanques de aireación varía de 0.6 m (2 ft) a 18 m (60 ft). Los sistemas con dique de oxidación tienden a ser poco profundos, en tanto que algunos sistemas de aireación difusa a alta velocidad utilizan tanques profundos, para proporcionar una transferencia de oxígeno más eficiente.

Con independencia del equipo de aireación utilizado, las velocidades de transferencia de oxígeno deben proporcionar de 0.6 a 1.4 kg de oxígeno/kg de la BOD5 (0.6 a 1.4 lb de oxígeno/lb de la BOD5), estabilizados en el tanque de aireación para la demanda de oxígeno carbonoso. La oxidación del nitrógeno puede incrementar la demanda de oxígeno a una velocidad de 4.3 kg (4.3 lb) de oxígeno/kg (lb) de nitrógeno amoniacal oxidado. Con bajas velocidades de transferencia de oxígeno, será necesario eliminar un exceso mayor de sedimento activado que el necesario a velocidades elevadas de transferencia de oxígeno. En este caso, nuevamente las consideraciones económicas del manejo del sedimento deben compararse con el costo de la transferencia de oxígeno. La cantidad de sedimento o lodo activado a desechar depende de las características del agua de desperdicio. Los sólidos inertes en suspensión que entran al sistema de tratamiento deben eliminarse con el exceso de sedimento activado. Los compuestos orgánicos solubles se estabilizan, al convertir una parte de éstos en sólidos en suspensión, que producen de 0.3 a 0.8 kg (0.3 a 0.8 lb) de sólidos volátiles en suspensión/kg (lb) de la BOD5 estabilizada. Los sólidos bio-

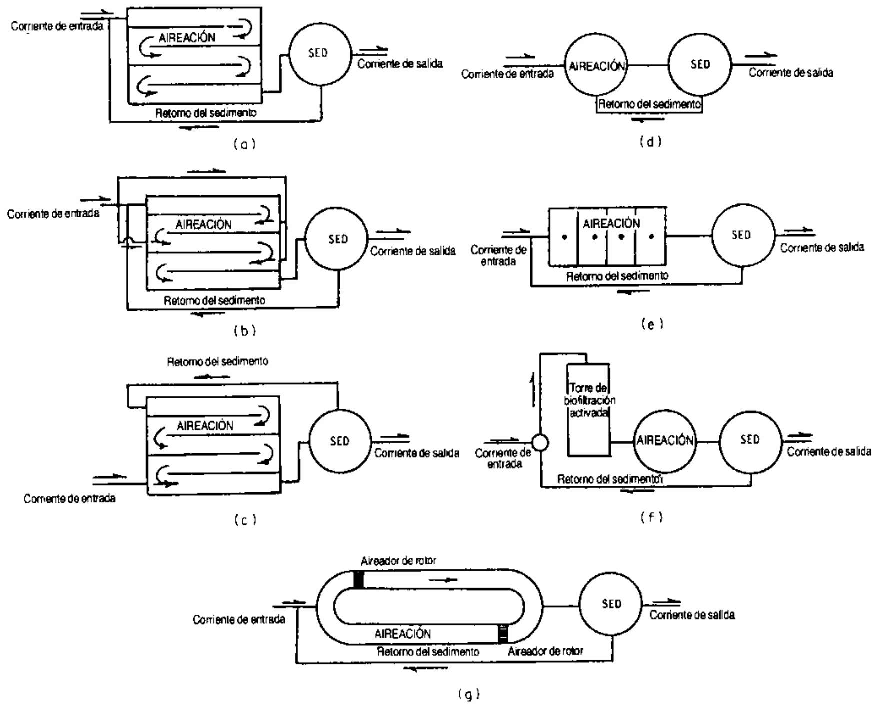


FIG. 26-38 Diagramas esquemáticos de las diferentes modificaciones al proceso de sedimento activado. *a*) Sedimento activado convencional. *b*) Aireación por pasos. *c*) Estabilización por contacto. *d*) Mezclado completo. *e*) Oxígeno puro. *f*) Biofiltración activada. *g*) Dique de oxidación.

degradables en suspensión presentes en las aguas de desperdicio dan por resultado la destrucción de los sólidos originales suspendidos y su conversión en una nueva forma. Dependiendo de las características químicas de los sólidos biodegradables en suspensión, el factor de conversión varía entre 0.7 y 1.2 kg (0.7 y 1.2 lb) de sólidos microbianos producidos/kg (lb) de sólidos en suspensión destruidos. Si los sólidos en suspensión producidos por el metabolismo no se desechan del sistema, con el tiempo saldrán con el efluente. A pesar de que se han realizado considerables esfuerzos para el desarrollo de sistemas de sedimento activado, que consuman en su totalidad el exceso de sólidos, ninguno de dichos sistemas ha demostrado ser práctico. El concepto de la oxidación total de exceso de sedimento es fundamentalmente falso y debe reconocerse como tal.

Tanques de sedimentación Estos tanques son parte integral de cualquier sistema de sedimento activado. Si se desea obtener un efluente de alta calidad es necesario separar los sólidos en suspensión del líquido tratado. Los tanques circulares de sedimentación con diversos tipos de colectores hidráulicos de sedimento se han convertido en el sistema estándar de sedimentación secundaria. Los tanques cuadrados con pared común se utilizan para el modelo compacto con tanques múltiples. La mayor parte de los tanques secundarios de sedimentación tienen las entradas de alimentación al centro y las salidas con vertederos periféricos. Recientemente se ha desarrollado el empleo de entradas periféricas, con controladores de flujo tipo orificio sumergido y salidas que pueden ser por medio de un vertedero central o un vertedero periférico, adyacente al canal periférico de entrada.

Aparte del control de flujo, las consideraciones básicas de diseño se han centrado en las velocidades superficiales de sobreflujo, el tiempo de retención y la velocidad de sobreflujo del vertedero. Las velocidades superficiales de sobreflujo se han reducido de 33 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [800 $gal/(ft^2 \cdot día)$] a 24 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [600 $gal/(ft^2 \cdot día)$], a 16 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [400 $gal/(ft^2 \cdot día)$] e incluso, en algunos casos, hasta 12 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [300 $gal/(ft^2 \cdot día)$], con base en los flujos promedios del desperdicio no tratado. Los resultados de operación no han demostrado que menores velocidades superficiales de sobreflujo mejoren la calidad del efluente, lo cual hace que en la mayor parte de los sistemas la selección de diseño sea 33 $m^3/(m^2 \cdot día)$ [800 $gal/(ft^2 \cdot día)$]. Se ha descubierto que el tiempo de retención es un factor importante de diseño. El tiempo promedio es de 2 h, con base en los flujos de desperdicio no tratado. Periodos de retención más largos generan problemas de elevación del sedimento, en tanto que periodos más cortos no suministran una buena separación de los sólidos para velocidades de flujo con alto retorno de sedimento. Las velocidades de sobreflujo del efluente del vertedero se han limitado a 186 $m^3/(m \cdot día)$ [15 000 $gal/(ft \cdot día)$], con una tendencia a reducir la velocidad a 124 $m^3/(m \cdot día)$ [10 000 $gal/(ft \cdot día)$ 15 000 $gal/(ft \cdot día)$]. Al utilizar vertederos de salida de dos lados y volados sobre la periferia del tanque se obtienen menores velocidades de sobreflujo del vertedero. Desafortunadamente el ajuste adecuado de los vertederos de dos lados crea más problemas hidráulicos que la velocidad de sobreflujo del vertedero. Los datos de campo han demostrado que la calidad del efluente no se ve realmente afectada por velocidades de sobreflujo del vertedero de 990 $m^3/(m \cdot día)$ [80 000 $gal/(ft \cdot día)$] o in-

cluso 1240 $m^3/(m \cdot dí$
ción con un diseño ad
solo vertedero perifé
dimentación, porque
La profundidad d
retención y la veloc
reducen estas veloci
que, para evitar un t
profundidad es un p
más importante que
tan las concentracio
(MLSS) también de
mo es de 3.0 m (10
hasta de 4.5 m (15 ft)
de 3000 mg/l, en co
nes MLSS superior
mentación debe inc
tante es dejar un m
para que los flujos
cima del vertedero
Placas desviador
ción y recolectores
gurar que los sólid
eliminen tan pronto
colección del sedim
to, pero han creado
señaron para elimi
que la de los raspa
una buena distribu
mento es necesario
sedimento y dismin
de entrada al tanqu
que elevan la capa d
causa un pérdida ex
del efluente. Los d
convencionales de
sistemas hidráulico
velocidades de reto
centraciones MLS
de retorno de sedim
100% del flujo de d
En el asentamien
tivado hasta una co
licos de recolecció
feriores a 8000 m
eliminar a través d
tolva de desecho d
concentraciones d
sedimento activad
mario. Desafortun
activado de desec
consumo conside
de producir una co
ción con aire prod
mento activado h
limitada. Los filtro
trífugas si el sedi
prensa y los de ban
sólidos. Es muy im
mado en los tanqu
así se deteriora la c
das necesarias par
dimento no contro
cesario disponer d
durante el manten
En ningún momen
tación para almac
variaciones diarias

cluso 1240 $m^3/(m \cdot día)$ [100 000 $gal/(ft \cdot día)$] en un tanque de sedimentación con un diseño adecuado. Desde el punto de vista de la operación, un solo vertedero periférico es lo mejor para los tanques secundarios de sedimentación, porque se puede ajustar y mantener limpio fácilmente.

La profundidad del tanque se determina con base en el tiempo de retención y la velocidad superficial de sobreflujo. A medida que se reducen estas velocidades también disminuye la profundidad del tanque, para evitar un tiempo excesivo de retención. Se reconoce que la profundidad es un parámetro válido de diseño y en algunos sistemas es más importante que el tiempo de retención. A medida que se incrementan las concentraciones de los sólidos en suspensión del licor mezclado (MLSS) también debe incrementarse la profundidad, cuyo valor mínimo es de 3.0 m (10 ft) para operaciones variables con profundidades hasta de 4.5 m (15 ft), si es necesario mantener concentraciones MLSS de 3000 mg/l, en condiciones hidráulicas variables. Con concentraciones MLSS superiores a 4000 mg/l, la profundidad del tanque de sedimentación debe incrementarse a 6.0 m (20 ft). En este caso, lo importante es dejar un margen libre sobre la capa de sedimento asentado, para que los flujos hidráulicos variables no eleven los sólidos por encima del vertedero de salida.

Placas desviadoras de espuma alrededor del tanque de sedimentación y recolectores radiales de espuma son equipo estándar, para asegurar que los sólidos que se elevan y otros materiales espumosos se eliminen tan pronto como se forman. Los tubos hidráulicos para la recolección del sedimento han reemplazado el pozo central de sedimento, pero han creado varios problemas de operación. Estos tubos se diseñaron para eliminar el sedimento asentado a una velocidad mayor que la de los raspadores convencionales de sedimento. Para obtener una buena distribución hidráulica en los tubos recolectores de sedimento es necesario incrementar la velocidad de flujo de retorno del sedimento y disminuir su concentración. El incremento en el flujo total de entrada al tanque de sedimentación crea un aumento de las fuerzas que elevan la capa de sedimento asentado en la pared del tanque, lo que causa un pérdida excesiva de sólidos en suspensión y reduce la calidad del efluente. Los datos de operación tienden a favorecer los tanques convencionales de sedimentación secundaria en comparación con los sistemas hidráulicos de recolección del sedimento. Por lo general, las velocidades de retorno de sedimento varían entre 25 y 50% para concentraciones MLSS hasta de 3300 mg/l. La mayor parte de las bombas de retorno de sedimento son tipo centrífugo, con capacidades hasta de 100% del flujo de desperdicio sin tratar.

En el asentamiento por gravedad se puede concentrar sedimento activado hasta una concentración de 10 000 mg/l, pero los tubos hidráulicos de recolección de sedimento operan mejor a concentraciones inferiores a 8000 mg/l. El exceso de sedimento activado se puede eliminar a través del sistema de retorno de sedimento o mediante una tolva de desecho de sedimento, cerca del centro del tanque. Las bajas concentraciones de sólidos dan por resultado grandes volúmenes de sedimento activado de desecho, en comparación con el sedimento primario. Desafortunadamente, las características físicas del sedimento activado de desecho impiden una concentración significativa sin el consumo considerable de energía. El espesamiento por gravedad puede producir una concentración de 2% de sólidos, en tanto que la flotación con aire produce 4%. Las centrífugas pueden concentrar el sedimento activado hasta 10 o 15% de sólidos, pero la captación es limitada. Los filtros al vacío pueden igualar el rendimiento de las centrífugas si el sedimento se acondiciona químicamente. Los filtros prensa y los de banda y prensa pueden producir tortas con 15 a 25% de sólidos. Es muy importante que el exceso de sedimento activado formado en los tanques de aireación se elimine en forma regular; si no es así se deteriora la calidad del efluente. Se deben tomar todas las medidas necesarias para asegurar que los sistemas de espesamiento de sedimento no controlen las operaciones del sedimento activado. Es necesario disponer de equipo adicional para el manejo del sedimento durante el mantenimiento del equipo de espesamiento de sedimento. En ningún momento deben utilizarse los tanques finales de sedimentación para almacenar sedimento, salvo el tiempo requerido por las variaciones diarias de operación.

TRATAMIENTO FÍSICO Y QUÍMICO (PCT)

Conceptos del PCT Los procesos para el tratamiento físico y químico se desarrollaron para tratar las aguas de desperdicio que son tóxicas al tratamiento biológico o difíciles de tratar con este método. En unos cuantos casos el PCT sustituye al tratamiento biológico. El primer paso en el PCT es el empleo de precipitadores químicos para eliminar los sólidos en suspensión por floculación y sedimentación por gravedad. Después, el efluente claro pasa a través de un lecho de carbón activado para eliminar los compuestos orgánicos solubles. Si se desea eliminar las sales solubles, el efluente se pasa a través de resinas de intercambio iónico. El PCT puede producir un efluente con calidad suficiente para reutilizarlo. También se han empleado filtros de arena o medios múltiples, después de la precipitación química y la sedimentación por gravedad, para producir un efluente de mayor calidad, que se pasa por el lecho de carbón activado. Otro proceso utilizado es la ósmosis inversa, como tratamiento final, si se desea un agua de un alta calidad para su reutilización.

Limitaciones del PCT La adición continua de productos químicos y la eliminación del sedimento químico son las principales limitaciones del PCT. Los coagulantes químicos no sólo agregan sólidos en suspensión a los sólidos suspendidos de desecho, sino que además adicionan sales solubles al efluente. Una separación inadecuada de los sólidos en suspensión da por resultado el acarreo de sólidos al lecho de carbón activado, que actúa como filtro y adsorbedor de los compuestos orgánicos. Desafortunadamente, la mayor parte de los lechos de carbón activado no se proyectan para una eliminación fácil de los sólidos en suspensión. Por este motivo a menudo se colocan filtros de medios múltiples después de la precipitación química y la sedimentación, para asegurar la eliminación de los sólidos suspendidos antes de la adsorción con carbón. Se ha visto la necesidad de utilizar ósmosis inversa cuando se desea un efluente de alta calidad para su reutilización pero este proceso sólo concentra los contaminantes en un volumen menor, que debe manejarse como aguas de desperdicio concentradas.

PROCESAMIENTO DEL SEDIMENTO

Objetivos Los sedimentos o lodos procedentes de los sistemas de tratamiento primario y secundario presentan problemas importantes de procesamiento en los sistemas de tratamiento del desperdicio. Los sedimentos constan de compuestos orgánicos no estabilizados y concentrados, junto con compuestos orgánicos e inorgánicos inertes. Los sedimentos inertes deben recolectarse, concentrarse, filtrarse y regresarse al medio ambiente. Los compuestos orgánicos biodegradables en el sedimento causan problemas y requieren un procesamiento posterior. El proceso normal de los sedimentos consiste en un espesamiento para reducir el volumen total a manejar y un tratamiento biológico o térmico para su estabilización.

Espesamiento Para concentrar los sólidos se utiliza espesamiento por gravedad. Los sedimentos primarios se pueden espesar hasta 6 u 8% y los secundarios hasta 2%. Ya que estas concentraciones se pueden lograr en un tanque de sedimentación bien diseñado y operado, el espesamiento por gravedad tiene poco valor y algunos aspectos negativos. La actividad microbiana crea olores molestos e hidroliza parte de los compuestos orgánicos. El flujo de retorno devuelve algunos sólidos y compuestos orgánicos solubles al sistema de tratamiento, para su eliminación por segunda vez.

Flotación La flotación con aire es satisfactoria para concentrar sedimentos secundarios hasta aproximadamente 4%. Por lo general, los sólidos que entran se saturan con aire a una presión de 275 a 350 kPa (40 a 50 psig) antes de llegar al tanque de flotación. A medida que el aire entra en contacto con la solución, las burbujas finas recolectan en su parte inferior los sólidos en suspensión y los acarrean a la superficie del tanque. Las burbujas de aire compactan los sólidos que flotan a su máxima extensión. Normalmente, la razón aire-sólidos es 0.05 en peso. Los sólidos espesados se raspan de la superficie, en tanto que el

efluente se extrae de la mitad del tanque y se devuelve al sistema de tratamiento. En los tanques grandes de flotación con flujos elevados, el efluente se somete a presión en vez de los sólidos que entran y se recircula al flujo de entrada. Las dimensiones de los tanques de flotación están determinadas básicamente por la velocidad de carga de sólidos en forma directa o indirecta. Se ha descubierto que es adecuada una carga de sólidos de 25 a 97 kg/(m^2·día) [5 a 20 lb/(ft^2·día)]. Con base en el flujo, esto se traduce en un área superficial de 0.14 a 2.7 l/(m^2·día) [0.2 a 4 gal/(ft^2·min)]. La mayor parte del equipo de flotación se ha desarrollado por el método de prueba y error por varias empresas fabricantes de equipo que suministran sus propias unidades.

Centrifugación Tanto las centrífugas de canasta como de tazón sólido se emplean para concentrar los sedimentos de desecho. Los datos de campo muestran que es posible obtener concentraciones de 10 a 15% de sólidos con el sedimento activado de desecho, de 15 a 25% de sólidos con una mezcla de sedimentos primario y activado de desecho y hasta 30 a 35% de sólidos con el sedimento primario exclusivamente. Las centrífugas dan por resultado una captación de sólidos de 85 a 90%, con una buena operación. El problema es que la zona central del centrifugado contiene los sólidos finos, cuya eliminación no es fácil y, por lo general, esta parte del producto centrifugado se devuelve al proceso de tratamiento, de donde puede ser extraída o no. Desde el punto de vista económico, las centrífugas no se recomiendan a menos que la concentración de la torta de sedimento producida tenga por lo menos de 20 a 25% de sólidos. En su mayor parte, las centrífugas diseñadas por los fabricantes de equipo se basan en la experiencia de campo. Al variar las características del sedimento, también varían considerablemente las de la centrífuga.

Digestión anaerobia Ya que los componentes orgánicos del sedimento primario o secundario contienen compuestos biodegradables, los sedimentos concentrados se pueden tratar mediante una digestión anaerobia. Los digestores anaerobios son grandes tanques cubiertos con tiempos de retención que varían entre 20 y 30 días, en función del volumen de sedimento que se agrega diariamente. En la actualidad, se construyen dos digestores anaerobios de iguales dimensiones y se operan en serie, para que cada unidad tenga un tiempo de retención de 10 a 15 días. El primer digestor se calienta con un intercambiador externo de calor hasta una temperatura de 35 a 37°C, para acelerar la velocidad de reacción. El mezclado proporciona un buen contacto entre los sólidos orgánicos que entran y los microbios. En el digestor anaerobio se puede utilizar mezclado con gas o mezcladores mecánicos. El segundo digestor es básicamente una unidad de separación de sólidos y, por lo general, no está equipado con instalaciones de calentamiento o mezclado. La nata superficial se recircula a la planta de tratamiento, en tanto se permite que el sedimento asentado se concentre de 6 a 8% de sólidos antes de regresarlo al medio ambiente.

La digestión anaerobia da por resultado la conversión de los compuestos orgánicos biodegradables en metano, bióxido de carbono y células microbianas. Debido a la energía contenida en el metano, la producción de masa microbiana es bastante baja, inferior a 0.1 kg/kg [0.1 lb de sólidos suspendidos volátiles (VSS)/lb] de la BCOD metabolizada, salvo para los desperdicios de carbohidratos. La producción de metano es 0.35 m^3/kg (5.6 ft^3/lb) de la BCOD destruida. Los gases del digestor contienen de 50 a 80% de metano y 20 a 50% de bióxido de carbono, dependiendo de las características químicas de los compuestos orgánicos de desecho a digerir.

Existen dos grupos principales de bacterias en los digestores anaerobios: las que forman ácido y las que forman metano. Las bacterias formadoras de ácido degradan los compuestos orgánicos complejos a ácidos orgánicos, que metabolizan las bacterias formadoras de metano. Es importante que las bacterias acidófilas no produzcan un exceso de ácido, pues si no es así el pH se reducirá a niveles tóxicos para las bacterias formadoras de metano. El mejor método para controlar la formación de ácido es la adición de compuestos orgánicos al digestor anaerobio. Una adición continua y uniforme de sólidos frescos mantiene el sistema en buenas condiciones de equilibrio. Si no se pueden agregar sólidos en forma continua, las adiciones deben ser a intervalos tan cortos como sea posible. El nivel de alcalinidad se mantiene por lo general entre 3000 y 5000 mg/l, para que el pH se sitúe en un valor superior a 6.5 como un amortiguador contra la producción variable de ácidos orgánicos, resultado de la variación en la carga orgánica. Las proteínas producen un amortiguador adecuado, pero los carbohidratos requieren la adición de alcalinidad para proporcionar un amortiguador suficiente.

Filtro anaerobio La digestión anaerobia está limitada por la capacidad del sistema para retener un alto nivel de bacterias formadoras de metano. El filtro anaerobio se desarrolló para retener estas bacterias en un medio fijo, con objeto de tratar altos volúmenes de compuestos orgánicos relativamente diluidos con digestión anaerobia y la producción de metano gaseoso. Se ha investigado considerablemente el tratamiento anaerobio de diversos tipos de aguas de desperdicio, con compuestos orgánicos solubles. Con un medio fijo, el tiempo de retención del fluido se reduce a unas cuantas horas o días, dependiendo de la concentración de las aguas de desperdicio. Por ejemplo, las aguas de desperdicio que contienen hasta 2000 mg/l de la BOCD se pueden tratar en unas cuantas horas; por otra parte, las aguas de desperdicio que contienen hasta 10 000 mg/l de la BOCD requieren varios días de retención. Si se logra un contacto adecuado entre los microbios y las aguas de desperdicio, se metaboliza aproximadamente 90% de la BOCD. La recirculación de las aguas de desperdicio alrededor del filtro incrementa la reducción de los compuestos orgánicos, al suministrar un contacto óptimo entre los microbios y los desperdicios. Las velocidades normales de recirculación son de 6 a 10 veces las velocidades de flujo del agua de desperdicio sin tratar.

Digestión aerobia El sedimento activado a desechar se trata más fácilmente en los sistemas aerobios que en los anaerobios. En el tanque de aireación se realiza una digestión aerobia parcial del sedimento; sin embargo, en la mayor parte de los casos sólo se logra una digestión de 25 a 35% del sedimento activado de desecho. Un periodo adicional de aireación de 15 a 20 días es adecuado para reducir la masa biodegradable de residuos a un nivel suficiente para su filtración y regreso al medio ambiente. Uno de los problemas en la digestión aerobia es la imposibilidad de concentrar los sólidos a niveles mayores a 2%. El segundo problema es la nitrificación. La alta concentración de proteína en los sólidos biodegradables da por resultado la liberación de amoniaco, que se puede oxidar durante los largos periodos de retención en el digestor aerobio. La limitación de la transferencia de oxígeno en el digestor aerobio es el mejor método para controlar la nitrificación y el bajo pH resultante. Los altos costos de potencia en la digestión aerobia ayudan a mantener el suministro de oxígeno cercano al nivel requerido.

Acondicionamiento químico La cal, el alumbre y varias sales férricas se utilizan para acondicionar el sedimento antes de filtrarlo. La cal reacciona para formar cristales de carbonato de calcio, que actúa como una matriz sólida para mantener separadas las partículas de sedimento y permitir que el agua escape durante el filtrado o el desaguado. El alumbre y las sales de hierro ayudan a desplazar parte del agua unida a los compuestos orgánicos hidrofílicos y a formar parte de la matriz inorgánica. El acondicionamiento químico incrementa en 10 a 25% la masa de sedimento final a manejar, dependiendo de las características del sedimento individual. Este tratamiento también ayuda a eliminar parte de las partículas finas, al incorporarlas en los precipitados químicos insolubles.

Acondicionamiento térmico El acondicionamiento térmico de los sedimentos a desechar se desarrolló para oxidar totalmente los compuestos orgánicos, pero surgieron problemas de operación al cambiar el tratamiento térmico de un proceso de oxidación total a un proceso de acondicionamiento térmico. Al elevar la temperatura entre 180 y 230°C durante 15 a 60 minutos es posible desaguar los sólidos restantes sin la adición de productos químicos. Para mantener fluido el sistema, la presión de operación del sistema de tratamiento térmico debe ser entre 1380 y 2070 kPa (200 a 300 lbf/in^2). Por lo general, después de la reacción térmica los sólidos se separan en un tanque cubierto de sedimentación. Los gases emitidos tienen olor desagradable y generalmente se pasan a un calcinador para su total combustión. El líquido que sobrenada se devuelve al proceso de tratamiento y se vuelve a tratar. Aproximadamente, 40 a 50% de los compuestos orgánicos

regresan al proceso
en las unidades biol
no favorecen al aco
Filtración al vac
para filtrar o desagı
un tambor rotatorio
ser de diversas fibr
aplicación de vacío
nado químicamente
sedimento, que se
sedimento. Cuando
reemplazan el vacío
a medida que la tel
de rodillos, donde
y cae por gravedad
do se transporta po
ción, en tanto que
tambor antes de en
los peores resultad
sechar y los mejor
mento activado de
a una velocidad de
Por otra parte, el s
ción hasta 25 a 30
seca/(m^2·h) [10 lb
Filtración a pre
se ha incrementado
una torta más seca
serie de placas y m
fuerza el paso de
Cuando se alcanza
sedimento y se per
residual antes de a
a un transportador
prensa opera a pre
psig) y el ciclo a
necesitan de 20 a
tortas de sedimen
a desechar, hasta
dicionamiento qu
mento.
Filtros prensa
sedimento activad
cuales se utiliza u
tivado de desecho
el agua se extrae p
pone en contacto c
sedimento entre lo
de sedimento se e
gravedad a un tran
den producir hasta
Lechos de aren
trar sedimentos di
operan mejor en si
talados en áreas m
gruesa hasta arena
0.45 a 0.6 m (1.5 a
superficie del filtr
que seca. El agua
sistema de tubos d
rico elimina lenta
minarse a mano de
to. El espesor de
aproximadamente
arena pueden ma
cos/(m^2·año) [10
dos se han utiliza
micas no favorec

regresan al proceso de tratamiento, lo que crea una carga considerable en las unidades biológicas. En la actualidad, los aspectos económicos no favorecen al acondicionamiento térmico de los sedimentos.

Filtración al vacío La filtración al vacío es el método más común para filtrar o desaguar los sedimentos. Los filtros al vacío constan de un tambor rotatorio cubierto con un medio filtrante de tela, que puede ser de diversas fibras plásticas o de lana. El filtro opera mediante la aplicación de vacío al tambor que gira dentro del sedimento acondicionado químicamente. El vacío mantiene adherida una capa delgada de sedimento, que se desagua a medida que el tambor sale de la tina de sedimento. Cuando el tambor gira al otro lado, chorros de aire a presión reemplazan el vacío y separan la torta de sedimento del medio filtrante a medida que la tela se aleja del tambor y se desplaza sobre una serie de rodillos, donde el sedimento se separa por medio de una cuchilla y cae por gravedad a un transportador de banda. El sedimento filtrado se transporta por la banda hasta el siguiente punto de concentración, en tanto que el medio filtrante se lava con rocío y regresa al tambor antes de entrar a la tina de sedimento. Los filtros al vacío dan los peores resultados si se utilizan para el sedimento activado a desechar y los mejores resultados con el sedimento primario. El sedimento activado de desecho se concentra hasta 12 a 18% de sólidos, a una velocidad de 4.9 a 9.8 kg de torta seca/(m^2·h) [1 a 2 lb/(ft^2·h)]. Por otra parte, el sedimento primario se puede concentrar por filtración hasta 25 a 30% de sólidos, a una velocidad de 49 kg de torta seca/(m^2·h) [10 lb/(ft^2·h)].

Filtración a presión Desde principios de la década de los setenta se ha incrementado el empleo de la filtración a presión porque produce una torta más seca de sedimento. Los filtros a presión constan de una serie de placas y marcos separados por un medio de tela. La presión fuerza el paso de sedimento al filtro mientras se extrae el filtrado. Cuando se alcanza la presión máxima, se detiene el flujo de entrada de sedimento y se permite que el filtro a presión descargue el sedimento residual antes de abrir el filtro y dejar que la torta caiga por gravedad a un transportador de banda, colocado bajo el filtro prensa. El filtro prensa opera a presiones que varían entre 689 y 1380 kPa (100 a 200 psig) y el ciclo a presión requiere de 1.5 a 4 h. Por lo general, se necesitan de 20 a 30 minutos para eliminar la torta del filtro. Las tortas de sedimento varían de 20 a 25% para el sedimento activado a desechar, hasta 50% para el sedimento primario. Se requiere acondicionamiento químico para obtener una buena filtración del sedimento.

Filtros prensa de banda Lo último en filtros para el manejo del sedimento activado a desechar son los filtros prensa de banda, en los cuales se utiliza una banda continua de tela filtrante. El sedimento activado de desecho se disemina sobre el medio filtrante e, inicialmente, el agua se extrae por gravedad. Después, la banda con el sedimento se pone en contacto con otra banda en movimiento, que oprime la capa de sedimento entre los rodillos e incrementa aún más la presión. La torta de sedimento se elimina al final del filtro con una cuchilla y cae por gravedad a un transportador de banda. Los filtros prensa de banda pueden producir hasta 20% de sólidos.

Lechos de arena Los filtros de lecho de arena se utilizan para filtrar sedimentos digeridos en forma anaerobia o aerobia. Estos filtros operan mejor en sistemas de tratamiento relativamente pequeños instalados en áreas más o menos secas. El lecho de arena consta de grava gruesa hasta arena fina en una serie de capas y con una profundidad de 0.45 a 0.6 m (1.5 a 2 ft). El sedimento digerido se coloca sobre toda la superficie del filtro hasta una profundidad de 0.3 m (1 ft) y se deja hasta que seca. El agua que pasa a través del lecho de arena se lleva a un sistema de tubos de subdrenaje y se saca del filtro. El secado atmosférico elimina lentamente el agua restante. El lodo o sedimento debe eliminarse a mano del lecho antes de agregar la segunda capa de sedimento. El espesor de la capa de sedimento se reduce de 0.3 m (12 in) a aproximadamente 0.006 m ($^1/_4$ in). Los filtros abiertos con lecho de arena pueden manejar, generalmente, de 49 a 122 kg de sólidos secos/(m^2·año) [10 a 25 lb/(ft^2·año)]. Tanto en climas fríos como húmedos se han utilizado filtros cubiertos, pero las consideraciones económicas no favorecen su uso.

COLOCACIÓN FINAL DEL SEDIMENTO

Incineración La incineración se utiliza para reducir el volumen del sedimento después del filtrado. Las fracciones orgánicas presentes en los sedimentos se incineran por sí mismas si no tienen demasiada agua. Para la combustión del sedimento se utilizan incineradores de hogar múltiple y de lecho fluidificado.

El incinerador de hogar múltiple consta de varias cámaras dentro de un horno cilíndrico vertical. El sedimento filtrado se alimenta a la cámara superior y se empuja lentamente a través del incinerador y cae por gravedad a la siguiente cámara o nivel, hasta que finalmente llega a la cámara del fondo. La cámara superior se utiliza para el secado del sedimento con los gases calientes de los niveles inferiores. A medida que se incrementa la temperatura del horno, los compuestos orgánicos inician su degradación y se queman. Se utiliza aire para suministrar el oxígeno necesario y controlar la temperatura durante la combustión. Es muy importante mantener una temperatura superior a 600°C para asegurar una oxidación completa de los compuestos orgánicos volátiles. Uno de los problemas en los incineradores de hogar múltiple es la volatilización de compuestos orgánicos olorosos en la fase de secado, antes de que la temperatura llegue al nivel de combustión. Aun con quemadores auxiliares en la línea de los gases de combustión no es suficiente para la oxidación completa. Se requieren dispositivos para el control de la contaminación del aire en todos los incineradores a efecto de eliminar las cenizas volátiles y los gases corrosivos. La ceniza formada en el incinerador debe enfriarse, recolectarse y depositarse nuevamente en el medio ambiente, por lo general, en rellenos sanitarios para ser enterrada. La ceniza residual tiene un peso que varía entre 10 y 30% del peso original del sedimento seco. Se requieren combustibles complementarios para encender el incinerador y asegurar las temperaturas adecuadas, con sedimentos que contengan un exceso de humedad, como, por ejemplo, el sedimento activado. Cada vez se considera más la recuperación del calor de los desperdicios. Es posible combinar los sedimentos con otros desperdicios para proporcionar un mejor combustible al incinerador.

En el incinerador de lecho fluidificado se utiliza arena caliente como depósito de calor para secar el sedimento y quemar los compuestos orgánicos. La turbulencia creada por el aire de entrada y la suspensión de arena requiere que los gases de salida se traten en un depurador en húmedo antes de descargarlos. Las ceniza se extrae del agua del depurador mediante un separador tipo ciclón. Por lo general, el agua se devuelve al proceso de tratamiento y se diluye con el efluente total de la planta. La ceniza se entierra.

Rellenos sanitarios del terreno A menudo, el sedimento seco, digerido o no, se entierra en un relleno sanitario para minimizar el impacto al medio ambiente. Recientemente se ha incrementado la preocupación respecto a los rellenos sanitarios, por lo que es más difícil el simple entierro de los sedimentos secos. Es necesario asegurarse de que no existen filtraciones en los rellenos sanitarios y deben monitorearse con regularidad, para determinar que no causan daño al medio ambiente. El contenido de humedad de la mayor parte de los sedimentos hace que constituyan un problema en los rellenos sanitarios diseñados para los desperdicios sólidos y es necesario enterrarlos por separado, incluso en el mismo relleno.

Diseminación en el terreno El contenido de nutrientes en la mayor parte de los sedimentos posibilita su uso como fertilizantes y acondicionadores de tierra si se mezclan en forma adecuada con la superficie del terreno. La diseminación en el terreno ha ganado popularidad en las áreas agrícolas. Por lo general, la proporción de aplicación del sedimento al terreno se controla mediante el contenido de nitrógeno del sedimento. Ya que los requerimientos de nitrógeno varían según los diferentes cultivos, la aplicación de nitrógeno está limitada aproximadamente al doble de los requerimientos de nitrógeno del cultivo propuesto. En el sedimento se dispone de aproximadamente la mitad del nitrógeno requerido. La liberación de los nutrientes del sedimento es más lenta que en los fertilizantes químicos, lo que permite disponer de los nutrientes a medida que el cultivo los requiere. El sedimento activado es un excelente acondicionador de tierra debido al humus que

contiene y que proporciona una buena matriz para el crecimiento de la raíz, mientras que los elementos nutrientes se liberan en una combinación adecuada, para el óptimo crecimiento de la planta. Existe preocupación sobre la presencia de metales pesados en algunos sedimentos y deben tomarse las medidas necesarias para reducir al mínimo las concentraciones de metales pesados en los sedimentos que se diseminan sobre el terreno. Dado que los metales pesados no se pueden eliminar fácilmente de los sedimentos, es importante evitar que entren al sistema de tratamiento del agua de desperdicio. Aún más preocupación causan otros materiales potencialmente tóxicos o peligrosos, que incluyen algunos compuestos orgánicos, como, por ejemplo, los pesticidas y PCB. La diseminación del sedimento sobre el terreno requiere una aplicación cuidadosa del sedimento sobre la superficie y es necesario mezclarlo con la tierra. Los microbios del terreno estabilizan los compuestos orgánicos biodegradables remanentes. Esta técnica de diseminación será más popular a medida que la energía y los nutrientes sean más escasos.

RECIRCULACIÓN Y REUTILIZACIÓN

Conservación del agua La escasez de agua se está incrementando en algunas áreas de Estados Unidos y continuará aumentando a medida que se incremente la población, por lo que las industrias deberán tomar medidas para la conservación del agua. Menos agua se desperdiciará y, en general, se incrementará la concentración de los desperdicios. En algunas áreas se utilizarán sistemas dobles de agua, para permitir el empleo de los efluentes tratados de las aguas de desperdicio en el riego del campo y otros usos no potables. El agua potable se regulará cuidadosamente para que su utilización sea segura. Las sequías periódicas han suministrado datos sobre los métodos para conservar los recursos limitados de agua y reducir al mínimo el efecto adverso sobre la industria afectada. Cada día más industrias instalan y mantienen programas regulares para la conservación del agua.

Segregación del agua En un futuro próximo se realizarán grandes esfuerzos para segregar los desperdicios tóxicos y peligrosos. Los requerimientos de la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) de la EPA están concebidos para alentar una pérdida mínima de los productos químicos tóxicos y peligrosos. Muchas industrias descubrirán que resulta económico segregar ciertos desperdicios y reutilizarlos en el proceso, o mantenerlos segregados como materia prima futura. La segregación del desperdicio hace que sea más fácil manejar ciertos desperdicios antes de mezclarlos con el agua de acarreo. No existe un método general para la segregación del desperdicio. Cada industria debe examinar sus propios procesos y determinar exactamente dónde se generan los desperdicios y cómo se puede controlar mejor cada corriente de desperdicio.

Descarga cero La Public Law 92-500 establece la descarga cero de contaminantes a los ríos y arroyos de Estados Unidos. En tanto que la descarga cero es un excelente concepto en lo fundamental, es inadecuado porque siempre existirán desperdicios líquidos que deberán tratarse y regresarse al medio ambiente. A pesar de que la descarga cero no es una meta práctica, la contaminación cero sí lo es y cada industria puede lograrla. La preocupación sobre la contaminación del agua ha hecho que muchas industrias reexaminen sus procesos básicos y desarrollen modificaciones que pueden producir el mismo producto con menos desperdicio. Comúnmente, menor desperdicio significa mayores utilidades o ganancias. El control de la contaminación del agua es una parte positiva de cada industria y jugará un papel más importante a medida que los escasos recursos tengan que conservarse y utilizarse con eficiencia máxima. La observancia forzosa de las reglamentaciones para el control de la contaminación del agua puede variar con las diferentes administraciones gubernamentales, pero seguirá siendo parte de las operaciones normales de la industria.

MANEJO DE LOS DESPERDICIOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

REFERENCIAS GENERALES: A. V. Bridgwater y C. J. Mumford, *Waste Recycling and Pollution Control Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1979. V. Cavaseno (ed.), *Industrial Wastewater and Solid Waste Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1980. EMCON Associates, *Methane Generation and Recovery from Landfills*, Ann Arbor Science Publishers/Butterworth Group, Woburn, Mass., 1981. A. Mallow, *Hazardous Waste Regulations: An Interpretive Guide*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1981. N. L. Nemerow, *Industrial Solid Wastes*, Ballinger Publishing Co., Cambridge, Mass., 1983. R. B. Pojasek (ed.), *Toxic and Hazardous Waste Disposal*, vols. 1-6, Ann Arbor Science Publishers/Butterworth Group, Woburn, Mass., 1979-1981. G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977. P.A. Vesilind y A. E. Rimer, *Unit Operations in Resource Recovery Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981. D. G. Wilson, (ed.), *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977.

INTRODUCCIÓN

Los "desperdicios sólidos" son todos aquellos que se derivan de las actividades humanas y animales, que por lo general son sólidos y se desechan por inservibles o indeseables. El término, como se utiliza en esta subsección, incluye todo y engloba la masa heterogénea de desperdicios procedentes de diversas actividades industriales, y también el conjunto más homogéneo de una sola actividad industrial. Para evitar confusiones, el término "residuo", que a menudo se intercambia por el término "desperdicios sólidos", no se utilizará en esta subsección.

Elementos funcionales Las actividades relacionadas con el manejo de los desperdicios sólidos, desde el punto donde se generan hasta su colocación final, se han agrupado en seis elementos funcionales que se muestran en la figura 26-39. Al considerar cada elemento funcional por separado es posible 1) identificar los aspectos y las relaciones fundamentales que se incluyen en cada elemento, y 2) desarrollar, si es posible, relaciones cuantificables con objeto de hacer comparaciones, análisis y evaluaciones técnicas.

Generación de los desperdicios La generación de los desperdicios engloba aquellas actividades en las cuales se determina que los materiales ya no tienen valor y se tiran o se recolectan para su colocación final. Desde el punto de vista económico, el mejor lugar para buscar materiales de desperdicio con objeto de recuperarlos es la fuente donde se generan.

Manejo, almacenamiento y procesamiento en el sitio Este elemento funcional engloba aquellas actividades relacionadas con el manejo, almacenamiento y procesamiento de los desperdicios sólidos en el punto de generación o en sus inmediaciones. El almacenamiento en el sitio es muy importante, debido a consideraciones estéticas y aspectos que se refieren a la salud y seguridad públicas, así como económicos.

Recolección El elemento funcional de la recolección incluye el acopio de los desperdicios sólidos y el transporte, después de recolectarlos, al lugar donde se vacía el vehículo de recolección. Como se aprecia en la figura 26-39, este lugar puede ser una estación de transferencia o procesamiento, o bien el lugar para la colocación final del desperdicio en un relleno de terreno.

Transferencia y transporte El elemento funcional de transferencia y transporte incluye dos pasos: 1) la transferencia de los desperdicios del vehículo de recolección más pequeño hasta el equipo de transporte más grande, y 2) el transporte subsecuente de los desperdicios, que por lo general abarca largas distancias, hasta el sitio para su colocación final.

FIG. 26-39 Elemer sólidos. (Fuente: G. T gineering Principles a

Procesamiento do con el procesan equipo e instalacio más elementos fun den utilizar, los pro cios sólidos.

Colocación fina el manejo de los de la colocación final independientemen tados directament dimentos) procede duos del incinera plantas de procesa alguno.

Sistemas de m prácticos relacion dicios sólidos, que ciamiento, las ope mación, la conta contrato, los regla

LEYES, REGLA GUBERNAMEN

Gran parte de la a manejo de los des desperdicios peli cuencia directa de tante 1) revisar la desperdicios sólic gubernamentales

Legislación legislación existe Los detalles esp puesta en práctica adoptados por las estos reglamento

ıs instalan y mantie-
agua.
e realizarán grandes
/ peligrosos. Los re-
covery Act (RCRA)
dida mínima de los
industrias descubri-
dicios y reutilizarlos
ıateria prima futura.
fácil manejar ciertos
carreo. No existe un
icio. Cada industria
exactamente dónde
rolar mejor cada co-

e la descarga cero de
idos. En tanto que la
ıdamental, es inade-
dos que deberán tra-
que la descarga cero
o es y cada industria
ıinación del agua ha
esos básicos y desa-
aismo producto con
icio significa mayo-
ninación del agua es
apel más importante
servarse y utilizarse
e las reglamentacio-
puede variar con las
ero seguirá siendo

ı elemento funcional
y las relaciones fun-
2) desarrollar, si es
acer comparaciones,

ión de los desperdi-
e determina que los
ctan para su coloca-
nejor lugar para bus-
perarlos es la fuente

e el sitio Este ele-
relacionadas con el
s desperdicios sóli-
iones. El almacena-
consideraciones es-
uridad públicas, así

colección incluye el
después de recolec-
colección. Como se
la estación de trans-
colocación final del

ional de transferen-
cia de los desperdi-
la el equipo de trans-
de los desperdicios,
el sitio para su colo-

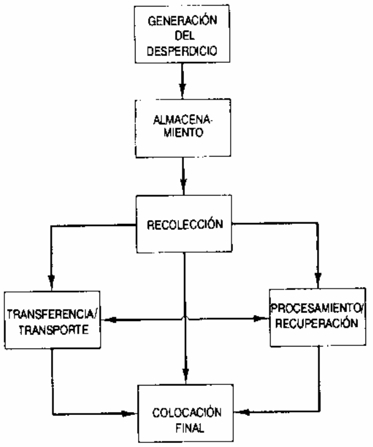


FIG. 26-39 Elementos funcionales en el sistema de manejo de desperdicios sólidos. (Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.)

Procesamiento y recuperación El elemento funcional relacionado con el procesamiento y la recuperación incluye todas las técnicas, equipo e instalaciones utilizadas para mejorar la eficiencia de los demás elementos funcionales y para recuperar los materiales que se pueden utilizar, los productos de conversión o la energía de los desperdicios sólidos.

Colocación final El último elemento funcional en el sistema para el manejo de los desperdicios sólidos, mostrado en la figura 26-39, es la colocación final, o sea, el último destino de los desperdicios sólidos, independientemente de que sean desperdicios recolectados y transportados directamente a un sitio de relleno, desperdicios semisólidos (sedimentos) procedentes de las plantas industriales de tratamiento, residuos del incinerador, mezclas u otras sustancias de las diferentes plantas de procesamiento de desperdicios sólidos, que ya no tienen uso alguno.

Sistemas de manejo de los desperdicios sólidos Otros aspectos prácticos relacionados con los sistemas para el manejo de los desperdicios sólidos, que no se incluyeron en esta presentación son: el financiamiento, las operaciones, el manejo del equipo, el personal, la información, la contabilidad y el presupuesto, la administración del contrato, los reglamentos y guías, y las comunicaciones públicas.

LEYES, REGLAMENTOS Y OFICINAS GUBERNAMENTALES DE ESTADOS UNIDOS

Gran parte de la actividad que actualmente se desarrolla en el área del manejo de los desperdicios sólidos, en especial la relacionada con los desperdicios peligrosos y la recuperación de los recursos, es consecuencia directa de la legislación reciente. En consecuencia, es importante **1)** revisar la legislación principal que afecta toda el área de los desperdicios sólidos, y **2)** examinar el papel de las diferentes oficinas gubernamentales responsables de poner en práctica la legislación.

Legislación A continuación se presenta una breve revisión de la legislación existente que afecta el manejo de los desperdicios sólidos. Los detalles específicos de esta legislación deben consultarse. La puesta en práctica de la legislación se realiza a través de reglamentos adoptados por las oficinas federales, estatales y municipales y ya que estos reglamentos se revisan continuamente, también deben consultarse en forma constante, en especial cuando es necesario realizar tareas de diseño y construcción.

Rivers and Harbors Act, 1899 (Ley de Ríos y Puertos, 1899) Promulgada en 1899, esta ley encomendó al Cuerpo de Ingenieros del Ejército el control de la colocación de desechos en aguas navegables y terrenos adyacentes.

Solid Waste Disposal Act, 1965 (Ley de Colocación de los Desperdicios Sólidos, 1965) La legislación moderna relacionada con los desperdicios sólidos data de 1965, cuando el Congreso aprobó esta ley, Artículo II de la Public Law 88-272. El objetivo principal de esta ley fue promover la demostración, construcción y aplicación de los sistemas para el manejo de los desperdicios sólidos y la recuperación de recursos, para preservar y mejorar la calidad de los recursos de aire, agua y tierra.

National Environmental Policy Act, 1969 (NEPA) (Ley Nacional de la Política Relacionada con el medio ambiente, 1969) Esta fue la primera ley federal que requirió la coordinación de los proyectos federales y su influencia sobre los recursos de la nación. La ley especificó la creación del Council on Environmental Quality (Consejo sobre la Calidad del Medio Ambiente) en la Oficina Ejecutiva del Presidente. Este Consejo posee la autoridad necesaria para obligar a que todas las oficinas federales presenten un informe sobre la influencia en el medio ambiente de toda actividad o proyecto que patrocinen o sobre el que tengan jurisdicción.

Resources Recovery Act, 1970 (Ley de Recuperación de los Recursos, 1970) La Ley de Colocación de los Desperdicios Sólidos de 1965 fue modificada por esta ley promulgada en la Public Law 95-512. El objetivo de esta ley fue recalcar que el programa nacional para el manejo de los desperdicios sólidos debería modificar su objetivo principal, es decir, la colocación de los desperdicios, por el de recirculación y reutilización de los materiales recuperables en los desperdicios sólidos o la conversión de los desperdicios en energía.

Occupational Safety and Health Act, 1970 (Ley de Salud y Seguridad Ocupacional, 1970) Aprobada por el Congreso en el citado año, esta ley (OSHA) se preparó para proteger a los trabajadores, al mejorar la seguridad en su medio de trabajo. Las industrias químicas fueron las más directamente afectadas por la Subsección 2, relacionada con la exposición de los trabajadores a sustancias tóxicas o peligrosas.

Resource Conservation and Recovery Act, 1976 (RCRA) (Ley de conservación y recuperación de los recursos, 1976.) Esta ley tiene como fin lograr dos metas principales: **1)** asegurar que todos los desperdicios sólidos y peligrosos se manejen de tal manera que se proteja la salud pública y el medio ambiente, y **2)** conservar los recursos nacionales directamente y a través del manejo, reutilización o recuperación de los desperdicios sólidos y peligrosos. Para cumplir con estos objetivos se identificaron en la ley tres programas principales, que son: **1)** el establecimiento de un programa de control de los desperdicios peligrosos, que administran los estados, o cuando los estados prefieren no hacerlo, lo administra la EPA; **2)** el establecimiento de un programa que reglamente la colocación de desperdicios en los terrenos, y **3)** la iniciación y el apoyo a los programas de conservación de los recursos, a través de los gobiernos estatales y municipales para conservar los recursos y reducir la cantidad de desperdicios sólidos que es necesario colocar en los terrenos.

Toxic Substances Control Act, 1976 (TSCA) Los dos objetivos principales de esta ley (TSCA), aprobada por el Congreso en 1976, son: **1)** la recopilación de información suficiente para identificar y evaluar los riesgos potenciales de las sustancias químicas, y **2)** la reglamentación de la fabricación, procesamiento, distribución, empleo y colocación final de toda sustancia que presente un riesgo no razonable de daño a la salud o al medio ambiente.

Leyes diversas Otras leyes que se aplican a los problemas para el manejo de los desperdicios sólidos en relación con el control del medio ambiente son la Noise Pollution and Abatement Act, 1970 (Ley de Aire Limpio, 1970) la Public Law 91-604.

Oficinas gubernamentales Las diversas leyes, reglamentos y órdenes ejecutivas han creado una división de responsabilidades entre varias oficinas y departamentos federales, para la reglamentación y el

financiamiento del manejo de los desperdicios sólidos. Algunas de las oficinas más importantes son las siguientes:

Environmental Protection Agency (Oficina de Protección del Medio Ambiente) La EPA, creada por orden presidencial en 1970, es la oficina central o principal para el control de la contaminación de los recursos del aire, agua y tierra de la nación. Ella se encargó de las responsabilidades encomendadas al U. S. Public Health Service (Servicio de Salud Pública de EEUU) para el control de la contaminación del aire, la calidad del suministro de agua y el manejo de los desperdicios sólidos. La Federal Water Pollution Control Administration (Administración Federal para el Control de la Contaminación del Agua) se suprimió y se incorporó a la EPA.

U. S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU) La responsabilidad de este Cuerpo en el área del manejo de los desperdicios sólidos se mencionó con anterioridad.

Department of Labor (Departamento del Trabajo) La OSHA de 1970 facultó al secretario del Trabajo el establecimiento de normas obligatorias para proteger la salud y seguridad en el trabajo de todos los empresarios y empleados de negociaciones relacionadas con el comercio interestatal. La seguridad en el trabajo es un problema importante en el diseño de las instalaciones para el manejo de los desperdicios sólidos, que antes presentaba un alto índice de accidentes.

Department of Transportation (Departamento de Transportes) Se han impuesto reglamentos rigurosos para el transporte de desperdicios peligrosos. Los recipientes deben marcarse y es necesario colocarlos en recipientes especialmente diseñados y aprobados. Los guardacostas controlan los embarques por mar de los desperdicios sólidos peligrosos.

Interstate Commerce Commission (Comisión Interestatal de Comercio) Esta comisión controla las tarifas de los fletes. En la actualidad existen diferencias en las tarifas para el embarque de materiales vírgenes (no procesados), en oposición a las tarifas más elevadas para los productos manufacturados o usados.

Department of Health and Human Services (Departamento de Servicios de Salud y Humanos) Los efectos de las instalaciones para la colocación final de los desperdicios sólidos sobre la salud pública, en especial los lugares para la colocación en los terrenos, donde se requiere un control sobre el origen para prevenir la transmisión de enfermedades, es responsabilidad de este Departamento. A través de varias oficinas regionales este Departamento coopera con las dependencias estatales de salud pública.

GENERACIÓN DE LOS DESPERDICIOS SÓLIDOS

Como ya se mencionó, los desperdicios sólidos incluyen todos los materiales sólidos o semisólidos que se considera que ya no tienen valor suficiente para conservarlos en un medio determinado. (Los desperdicios descargados pueden tener un valor significativo en otro medio.) En esta subsección se considerarán los tipos y fuentes de desperdicios sólidos, su composición física y química y las velocidades características de generación de los desperdicios sólidos.

Tipos de desperdicios sólidos El término desperdicios sólidos los incluye a todos y también engloba todas las fuentes, tipos de clasificación, composiciones y propiedades de estos desperdicios. Como base para los análisis subsecuentes conviene definir los diversos tipos de desperdicios sólidos que se generan.

Desperdicios sólidos convencionales Es importante reconocer que en la práctica y la literatura varían considerablemente las definiciones y clasificaciones del término "desperdicios sólidos". En consecuencia, el empleo de los datos publicados requiere precaución, juicio y sentido común. Como guía, se presentan las siguientes definiciones:

1. *Desperdicios alimenticios* Los desperdicios alimenticios son los sobrantes de animales, frutas y vegetales (también llamados basura), resultado del manejo, la preparación, cocción e ingestión de los alimentos. La característica más importante de estos desperdicios es que se pudren y descomponen rápidamente, sobre todo en tiempo de calor.

2. *Basura* La basura consta de desperdicios sólidos combustibles e incombustibles, sin incluir los desperdicios alimenticios o materiales que se pudren. En forma característica, la basura combustible consta de materiales como, por ejemplo, papel, cartón, plásticos, telas, hule, cuero, madera, muebles y desperdicios de jardinería. La basura no combustible consta de desperdicios como vidrio, losa, latas de estaño y aluminio, metales ferrosos y no ferrosos, polvo y desperdicios de construcción.

3. *Cenizas y sobrantes* Estos materiales resultan de la combustión de la madera, carbón, coque y otros desperdicios combustibles. Por lo general, los desperdicios de las centrales eléctricas no se incluyen en esta categoría. Normalmente, las cenizas y sobrantes se componen de materiales finamente pulverizados, cenizas, escoria y pequeñas cantidades de materiales quemados o parcialmente quemados.

4. *Desperdicios de construcción y demolición* Los desperdicios producto de la demolición de edificios y otras estructuras se clasifican como desperdicios de demolición. Los desperdicios producto de la construcción, remodelación y reparación de edificios comerciales e industriales y otras estructuras similares se clasifican como desperdicios de construcción, e incluyen tierra, piedras, concreto, ladrillos, yeso, madera, cascajo y accesorios eléctricos, de calefacción y de plomería.

5. *Desperdicios especiales* Desperdicios como los producidos por la limpieza de las calles, la basura de los lados de las carreteras y las cuencas receptoras, animales muertos y vehículos abandonados se clasifican como desperdicios especiales.

6. *Desperdicios de las plantas de tratamiento* Los desperdicios sólidos y semisólidos producto de las instalaciones para el tratamiento del agua, las aguas de desperdicio y los desperdicios industriales se incluyen en esta clasificación.

7. *Desperdicios agrícolas* Los desperdicios y desechos que resultan de las diversas actividades agrícolas como, por ejemplo, la siembra y la cosecha de los cultivos en general y la tala de árboles, la producción de leche, los animales de sacrificio y la operación de los lotes de alimentos se conocen como desperdicios agrícolas.

Desperdicios peligrosos Los desperdicios que plantean un peligro sustancial inmediato o diferido a la vida humana, vegetal o animal se clasifican como desperdicios peligrosos. Los desperdicios se clasifican como peligrosos si tienen las siguientes características: **1)** inflamabilidad, **2)** corrosividad, **3)** reactividad y **4)** toxicidad. Una definición detallada de estos términos se publicó por primera vez en el *Federal Register*, mayo 19 de 1980, pp. 33, 121-122.

Anteriormente, los desperdicios peligrosos se clasificaban a menudo en las siguientes categorías: **1)** sustancias radiactivas, **2)** productos químicos, **3)** desperdicios biológicos, **4)** desperdicios inflamables y **5)** explosivos. La categoría de productos químicos incluye los desperdicios que son corrosivos, reactivos y tóxicos. Las principales fuentes de desperdicios biológicos peligrosos son los hospitales y los laboratorios de investigación biológica.

Fuentes de desperdicios industriales El conocimiento de las fuentes y tipos de desperdicios sólidos, junto con los datos sobre su composición y velocidades de generación, es básico para el diseño y la operación de los elementos funcionales relacionados con el manejo de los desperdicios sólidos.

Desperdicios convencionales En la tabla 26-25 se presentan las fuentes y tipos de desperdicios sólidos industriales catalogados por el Standard Industrial Classification (SIC). Los desperdicios específicos que aparecen en la tabla son aquellos que se pueden identificar con más facilidad.

Desperdicios peligrosos En casi todas las actividades industriales se generan cantidades limitadas de desperdicios peligrosos. En términos de la generación, lo importante es la identificación de las cantidades y tipos de desperdicios peligrosos desarrollados en cada fuente, con hincapié en aquellas que generan cantidades significativas de desperdicios. Desafortunadamente, se dispone de muy pocos datos rela-

TABLA 26-25

Código	Clasi
19	Pertrechos
20	Productos
22	Productos
23	Ropa y otr
24	Productos
25*a*	Muebles d
25*b*	Muebles d
26	Papel y pr
27	Impresos
28	Productos
29	Refinería
30	Hule y pl
31	Cuero y
32	Producto
33	Industria
34	Product
35	Maquin
36	Eléctric
37	Equipo
38	Instrum
39	Manuf

* Fuente: C. L.

: todo en tiempo de

ilidos combustibles
:nticios o materiales
combustible consta
lásticos, telas, hule,
ıería. La basura no
losa, latas de estaño
ɔ y desperdicios de

ıltan de la combus-
icios combustibles.
ıtricas no se incluyen
rantes se componen
escoria y pequeñas
e quemados.
n Los desperdicios
ıcturas se clasifican
cios producto de la
icios comerciales e
fican como desper-
as, concreto, ladri-
ɔs, de calefacción y

mo los producidos
s de las carreteras y
ılos abandonados se

o Los desperdicios
s para el tratamiento
icios industriales se

desechos que resul-
ejemplo, la siembra
: árboles, la produc-
ıción de los lotes de
s.
plantean un peligro
vegetal o animal se
perdicios se clasifi-
cterísticas: 1) infla-
ticidad. Una defini-
imera vez en el Fe-
.
:lasificaban a menu-
ctivas, 2) productos
ios inflamables y 5)
ıcluye los desperdi-
ıncipales fuentes de
ales y los laborato-

ınocimiento de las
ı los datos sobre su
:o para el diseño y la
los con el manejo de

25 se presentan las
s catalogados por el
erdicios específicos
ı identificar con más

ridades industriales
eligrosos. En térmi-
ıción de las cantida-
dos en cada fuente,
gnificativas de des-
ıy pocos datos rela-

TABLA 26-25 Fuentes y tipos de desperdicios industriales*

Código	Clasificación del grupo SIC	Proceso de generación del desperdicio	Desperdicios específicos esperados
19	Pertrechos y accesorios	Fabricación, montaje	Residuos de metales, plástico, hule, papel, madera, tela y productos químicos
20	Productos alimenticios y similares	Procesamiento, embalaje, embarque	Carnes, grasas, aceites, huesos, desperdicios de reses muertas, vegetales, frutas, nueces y conchas, cereales
22	Productos de la industria textil	Tejido en telar, procesamiento, teñido, embarque	Residuos de ropa y filtros
23	Ropa y otros productos terminados	Corte, costura, apresto, planchado	Ropa, fibras, metales, plásticos, hule
24	Productos de madera	Aserraderos, recipientes de madera, productos diversos de madera, fabricación	Desperdicio de madera, virutas, aserrín; en algunos casos, metales, plásticos, fibras, pegamentos, selladores, pinturas y disolventes
25*a*	Muebles de madera	Fabricación de muebles para el hogar y la oficina, mamparas, habilitaciones de tiendas y oficinas, colchones	Los productos listados en el código 24 y, además, residuos de ropa y guata de algodón
25*b*	Muebles de metal	Fabricación de muebles para el hogar y la oficina, alacenas, resortes, marcos	Metales, plásticos, resinas, vidrio, madera, hule, adhesivos, ropa, papel
26	Papel y productos relacionados	Fabricación de papel, conversión de papel y cartón, fabricación de cajas y recipientes de cartón	Residuos de papel y de fibras, productos químicos, recubrimientos de papel y rellenos, tintas, pegamentos, fijadores
27	Impresos y publicaciones	Periódicos, impresos, litografías, grabado, encuadernación	Papel, impresos, cartón, metales, productos químicos, ropa, tintas, pegamentos
28	Productos químicos y relacionados	Fabricación y preparación de productos químicos inorgánicos (que van desde drogas y jabones hasta pinturas, barnices y explosivos)	Productos químicos orgánicos e inorgánicos, metales, plásticos, hule, vidrio, aceites, pinturas, disolventes, pigmentos
29	Refinerías de petróleo e industrias afines	Fabricación de materiales para pavimentar y techar	Asfalto y alquitranes, fieltro, asbesto, papel, ropa, fibras
30	Hule y productos diversos de plástico	Fabricación de productos de hule y de plástico	Desperdicio de hule y plásticos, negro de humo, compuestos para curado, tintes
31	Cuero y productos de piel	Teñido de la piel y terminado, fabricación de correas y embalajes de piel	Desperdicio de cuero, hilo, tintes, aceites, compuestos para el procesamiento y curado
32	Productos de piedra, arcilla y vidrio	Fabricación de vidrio plano, fabricación o formación de vidrio; fabricación de productos de concreto, yeso y mortero, formación y procesamiento de piedra y productos relacionados, abrasivos, asbesto y productos diversos no minerales	Vidrio, cemento, arcilla, cerámica, yeso, asbesto, piedra, papel, abrasivos
33	Industrias primarias de metales	Operaciones de fundido, forjado, revenido, rolado, formado y extruido	Desperdicio de metales ferrosos y no ferrosos, escoria, arena, moldes, agentes de unión
34	Productos fabricados con metales	Fabricación de botes metálicos, herramientas manuales, aparatos de calentamiento no eléctrico, accesorios de plomería, productos estructurales, alambre, maquinaria y equipo agrícola, recubrimiento y grabado de metal	Metales, cerámica, arena, escoria, incrustaciones, recubrimientos, disolventes, lubricantes, licores para baño químico (decapado)
35	Maquinaria (excepto eléctrica)	Fabricación de equipo para la construcción, minería, elevadores, escaleras eléctricas, transportadores, camiones industriales, remolcadores, apiladoras, máquinas herramientas, etc.	Escoria, arena, moldes, desperdicio de metal, madera, plásticos, resinas, hule, ropa, pinturas, disolventes, productos derivados del petróleo
36	Eléctrica	Fabricación de equipo y artículos eléctricos, aparatos de comunicación, operaciones de maquinado, estirado, formado, soldado, estampado, devanado, pintura, plateado, horneado y encendido	Desperdicios de metal, carbón, vidrio, metales raros, hule, plásticos, resinas, fibras, residuos de ropa
37	Equipo de transporte	Fabricación de vehículos de motor, cuerpos de autobuses y camiones, partes y accesorios para vehículos de motor, aviones y sus partes, construcción de barcos y botes, reparación de motocicletas, bicicletas y sus partes, etc.	Desperdicios de metal, vidrio, fibras, madera, hule, plásticos, ropa, pinturas, disolventes, productos derivados del petróleo
38	Instrumentos científicos de control	Fabricación de instrumentos de ingeniería, para laboratorio, para investigación y equipo relacionado	Metales, plásticos, resinas, vidrio, madera, hule, fibras, abrasivos
39	Manufacturas diversas	Fabricación de joyería, artículos de plata y plateados, juguetes, artículos para diversión y deportes, artículos para atletismo, novedades, botones, escobas, cepillos, anuncios y publicidad	Metales, vidrio, plásticos, resinas, cuero, hule, mezclas, hueso, ropa, paja, adhesivos, pinturas, disolventes

* Fuente: C. L. Mantell (ed) *Solid Wastes: Origin, Collection, Processing and Disposal*, Wiley-Interscience, New York, 1975.

cionados con la cantidad de desperdicios peligrosos generados en las diferentes industrias.

También debe considerarse la generación de desperdicios peligrosos por derrame. Por lo general, la cantidad de desperdicios peligrosos incluidos en los derrames no se conoce. Después de un derrame, los desperdicios que requieren recolección y colocación final son, a menudo, considerablemente mayores que la cantidad de desperdicios derramados, sobre todo cuando se utiliza un material absorbente, como, por ejemplo, la paja para absorber los líquidos peligrosos, o cuando debe excavarse la tierra en la que se filtró el desperdicio líquido. Tanto la paja y el líquido como la tierra y el líquido se clasifican como desperdicios peligrosos.

Propiedades de los desperdicios sólidos La información sobre las propiedades de los desperdicios sólidos es importante para evaluar las necesidades de equipo opcional, los sistemas y los planes y programas para su manejo.

Composición física La información y los datos sobre la composición física de los desperdicios sólidos incluye: 1) la identificación de los componentes individuales que constituyen los desperdicios sólidos industriales y municipales, 2) la densidad de los desperdicios sólidos y 3) el contenido de humedad.

1. *Componentes individuales* En la tabla 26-26 aparecen los componentes característicos que constituyen los desperdicios sólidos industriales y municipales, así como su distribución relativa. A pesar de que se puede seleccionar cualquier número de componentes, se eligieron los que aparecen en la tabla, porque se pueden identificar fácilmente, están de acuerdo con las categorías de componentes que aparecen en la literatura y son adecuados para la caracterización de los desperdicios sólidos producto de la mayor parte de las aplicaciones.

2. *Densidad* En la tabla 26-27 se muestran las densidades características de diversos desperdicios encontrados en recipientes. Además, en la tabla se indica también la fuente de los desperdicios. Debido a que las densidades de los desperdicios sólidos varían considerablemente en función de la ubicación geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenamiento, deben seleccionarse los valores característicos con gran cuidado.

3. *Contenido de humedad* Por lo general, el contenido de humedad de los desperdicios sólidos se expresa como masa de humedad por unidad de masa de material húmedo o seco. En el método de medición de la masa húmeda, el contenido de humedad de la muestra se expresa como un porcentaje de la masa húmeda del material. En el método de la masa seca, dicho contenido se expresa como un porcentaje de la masa seca del material. Matemáticamente, el contenido de humedad de la masa húmeda se expresa como sigue:

$$\text{Contenido de humedad } (\%) = \left(\frac{a-b}{a}\right) 100 \qquad (26\text{-}1)$$

donde a = masa inicial de la muestra, según se recibe

b = masa de la muestra, después de secarla

En la tabla 26-27 aparecen los datos característicos sobre el contenido de humedad para los componentes de los desperdicios sólidos. En la mayor parte de los desperdicios sólidos industriales el contenido de humedad varía entre 10 y 25%.

TABLA 26-26 Datos característicos sobre la distribución de los desperdicios industriales generados por las principales industrias y municipios*

Código SIC	Porcentaje en peso									
	Desperdicios de alimentos †	Papel	Madera	Cuero	Hule	Plásticos	Metales	Vidrio	Textiles	Diversos
20 Productos alimenticios y similares	15-20	50-60	5-10	0-2	0-2	0-5	5-10	4-10	0-2	5-15
22 Productos de la industria textil	0-2	40-50	0-2	0-2	0-2	3-10	0-2	0-2	20-40	0-5
23 Ropa y otros productos terminados	0-2	40-60	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	30-50	0-5
24 Productos de madera	0-2	10-20	60-80	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	5-10
25*a* Muebles de madera	0-2	20-30	30-50	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-5	0-5
25*b* Muebles de metal	0-2	20-40	10-20	0-2	0-2	0-2	20-40	0-2	0-5	0-10
26 Papel y productos relacionados	0-2	40-60	10-15	0-2	0-2	0-2	5-15	0-2	0-2	10-20
27 Impresos y publicaciones	0-2	60-90	5-10	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-5
28 Productos químicos y relacionados	0-2	40-60	2-10	0-2	0-2	5-15	5-10	0-5	0-2	15-25
29 Refinerías de petróleo e industrias afines	0-2	60-80	5-15	0-2	0-2	10-20	2-10	0-12	0-2	2-10
30 Hule y productos diversos de plástico	0-2	40-60	2-10	0-2	5-20	10-20	0-2	0-2	0-2	0-5
31 Cuero y productos de piel	0-2	5-10	5-10	40-60	0-2	0-2	10-20	0-2	0-2	0-5
32 Productos de piedra, arcilla y vidrio	0-2	20-40	2-10	0-2	0-2	0-2	5-10	10-20	0-2	30-50
33 Industrias primarias de metales	0-2	30-50	5-15	0-2	0-2	2-10	2-10	0-5	0-2	20-40
34 Productos fabricados con metales	0-2	30-50	5-15	0-2	0-2	0-2	15-30	0-2	0-2	5-15
35 Maquinaria (excepto eléctrica)	0-2	30-50	5-15	0-2	0-2	1-5	15-30	0-2	0-2	0-5
36 Eléctrica	0-2	60-80	5-15	0-2	0-2	2-5	2-5	0-2	0-2	0-5
37 Equipo de transporte	0-2	40-60	5-15	0-2	0-2	2-5	0-2	0-2	0-2	15-30
38 Instrumentos científicos de control	0-2	30-50	2-10	0-2	0-2	5-10	5-15	0-2	0-2	0-5
39 Manufacturas diversas	0-2	40-60	10-20	0-2	0-2	5-15	2-10	0-2	0-2	5-15
Municipal	10-20	40-60	1-4	0-2	0-2	2-10	3-15	4-16	0-4	5-30

*Adaptado en parte de D. G. Wilson (ed) *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977.

†Con excepción de los productos alimenticios y similares, los desperdicios de alimentos son de cafeterías y restaurantes de compañías, etcétera.

Composición química La información sobre la composición química de los desperdicios sólidos es importante para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación. Si los desperdicios sólidos se utilizan como combustible, las cuatro propiedades más importantes a conocer son:

1. Análisis aproximado
   a. Humedad (pérdida a 105°C, durante 1 h)
   b. Materia volátil (pérdida adicional al quemar el desperdicio a 950°C)
   c. Ceniza (residuo después de la combustión)
   d. Carbón fijo (residual)
2. Punto de fusión de la ceniza
3. Análisis final, porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y ceniza
4. Valor calorífico

En la tabla 26-28 aparecen los datos característicos del análisis aproximado de los componentes combustibles de los desperdicios sólidos industriales y municipales.

Los datos característicos sobre el residuo inerte y los valores de energía para los desperdicios sólidos también aparecen en la tabla 26-28. Los

TABLA 26-27 Datos característicos de densidad y contenido de humedad para los desperdicios sólidos industriales, comerciales y domésticos

	Densidad kg/m³		Contenido de humedad, % en peso	
Artículo	Intervalo	Característico	Intervalo	Característico
Residencial (no comprimido)				
Desperdicios de alimentos (mezclados)	130–480	290	50–80	70
Papel	40–130	85	4–10	6
Cartón	40–80	50	4–8	6
Plásticos	40–130	65	1–4	2
Textiles	40–100	65	6–15	10
Hule	100–200	130	1–4	2
Cuero	100–260	160	8–12	10
Desperdicios de jardín	60–225	100	30–80	60
Madera	130–320	240	15–40	20
Vidrio	160–480	195	1–4	2
Latas de estaño	50–160	90	2–4	3
Metales no ferrosos	65–240	160	2–4	2
Metales ferrosos	130–1150	320	2–4	2
Polvo, cenizas, etc.	320–1000	480	6–12	8
Cenizas	650–830	745	6–12	6
Basura (mezclada)	90–180	130	5–20	15
Residencial (comprimida)				
En camión compactador	180–450	300	15–40	20
En rellenos (normalmente compactada)	360–500	450	15–40	30*
En rellenos (bien compactada)	590–740	600	15–40	30*
Comercial				
Desperdicios de alimentos (húmedos)	475–950	535	50–85	75
Aparatos	150–200	180	0–5	. . .
Cajas de madera	110–160	110	10–30	20
Recortes de árboles	100–180	150	20–80	50
Basura (combustible)	50–180	120	5–25	15
Basura (no combustible)	180–360	300	5–15	10
Basura (mezclada)	140–180	160	5–20	12
Construcción; demolición				
Demolición mezclada (no combustible)	1000–1600	1420	2–10	4
Demolición mezclada (combustible)	300–400	360	4–15	8
Construcción mezclada (combustible)	180–360	260	4–15	8
Concreto roto	1200–1800	1540	0–5	. . .
Desperdicios industriales				
Sedimentos químicos (húmedos)	800–1100	1000	75–99	80
Ceniza volátil	700–900	800	2–10	4
Desperdicio de cuero	100–250	160	6–15	10
Desperdicio de metal (pesado)	1500–2000	1780	0–5	. . .
Desperdicio de metal (ligero)	500–900	740	0–5	. . .
Desperdicio de metal (mezclado)	700–1500	900	0–5	. . .
Aceites, alquitranes, asfalto	800–1000	950	0–5	2
Aserrín	100–350	290	10–40	15
Desperdicios textiles	100–220	180	6–15	10
Madera (mezclada)	400–675	500	10–40	20
Desperdicios agrícolas				
Agrícolas (mezclados)	400–750	560	40–80	50
Desperdicios de frutas (mezclados)	250–750	360	60–90	75
Abono (húmedo)	900–1050	1000	75–96	94
Desperdicios vegetales (mezclados)	200–700	360	50–80	65

*Depende del grado de infiltración del agua superficial.

TABLA 26-28 Datos característicos del análisis aproximado y el contenido de energía de los componentes de los desperdicios sólidos industriales, comerciales y domésticos*

	Análisis aproximado, % en peso				Contenido de energía, kJ/kg		
Componente	Humedad	Materia volátil	Carbón fijo	No combustible	Según se recolectó	Seco	Libre de humedad y ceniza
Productos alimenticios							
Grasas	2.0	95.3	2.5	0.2	37 530	38 296	38 374
Desperdicios de alimentos (mezclados)	70.0	21.4	3.6	5.0	4 175	13 917	16 700
Desperdicios de frutas	78.7	16.6	4.0	0.7	3 970	18 638	19 271
Desperdicios de carnes	38.8	56.4	1.8	3.1	17 730	28 970	30 516
Productos de papel							
Cartón	5.2	77.5	12.3	5.0	16 380	17 278	18,240
Revistas	4.1	66.4	7.0	22.5	12 220	12 742	16 648
Periódicos	6.0	81.1	11.5	1.4	18 550	19 734	20 032
Papel (mezclado)	10.2	75.9	8.4	5.4	15 815	17 611	18 738
Cartón encerado	3.4	90.9	4.5	1.2	26 345	27 272	27 615
Plásticos							
Plásticos (mezclados)	0.2	95.8	2.0	2.0	32 000	32 064	32 720
Polietileno	0.2	98.5	<0.1	1.2	43 465	43 552	44 082
Poliestireno	0.2	98.7	0.7	0.5	38 190	38 266	38 216
Poliuretano	0.2	87.1	8.3	4.4	26 060	26 112	27 316
Cloruro de polivinilo	0.2	86.9	10.8	2.1	22 690	22 735	23 224
Madera, árboles, etc.							
Desperdicios de jardín	60.0	30	9.5	0.5	6 050	15 125	15 316
Madera verde	50.0	42.3	7.3	0.4	4 885	9 770	9 848
Madera dura	12.0	75.1	12.4	0.5	17 100	19 432	19 542
Madera (mezclada)	20.0	67.9	11.3	0.8	15 444	19 344	19 500
Cuero, hule, textiles, etc.							
Cuero (mezclado)	10	68.5	12.5	9.0	18 515	20 572	22 858
Hule (mezclado)	1.2	83.9	4.9	9.9	25 330	25 638	28 493
Textiles (mezclados)	10	66.0	17.5	6.5	17 445	19 383	20 892
Vidrio, metales, etc.							
Vidrio y mineral	2	....	....	96–99+	196†	200	200
Metal, latas de estaño	5	....	....	94–99+	1 425†	1 500	1 500
Metal, ferroso	2	....	....	96–99+	....	....	....
Metal, no ferroso	2	....	....	94–99+	....	....	....
Diversos							
Desperdicios de oficinas	3.2	20.5	6.3	70	8 535	8 817	31 847
Desperdicios municipales	20 (15–40)	53 (30–60)	7 (5–15)	20 (9–30)	10 470	13 090	17 450
Desperdicios industriales	15 (10–30)	58 (30–60)	7 (5–15)	20 (10–30)	11 630	13 682	17 892

*Adaptado en parte de D. G. Wilson (ed.), *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977, y G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

†El contenido de energía proviene de los recubrimientos, etiquetas y materiales agregados.

valores de energía disipada se pueden convertir a base seca mediante la ecuación 26-2:
kJ/kg (base seca)

$$= \text{kJ/kg (disipada)} \left(\frac{100}{100 - \%\ \text{humedad}}\right) \qquad (26\text{-}2)$$

La ecuación correspondiente en base seca libre de cenizas es kJ/kg (base seca libre de cenizas.)

$$= \text{kj/kg (disipada)} \left(\frac{100}{100 - \%\ \text{cenizas} - \%\ \text{humedad}}\right) \qquad (26\text{-}3)$$

Los datos representativos del análisis final de los componentes característicos de los desperdicios sólidos industriales y municipales se muestran en la tabla 26-29. Si no se dispone de los valores de energía, se pueden calcular los valores aproximados por medio de la ecuación (26-4), conocida como fórmula modificada de Dulong y los datos de la tabla 26-29.

$$\text{kJ/kg} = 337\,C + 1428\,(H - 1/8\,O) + 95\,S \qquad (26\text{-}4)$$

donde C = porcentaje de carbono
H = porcentaje de hidrógeno
O = porcentaje de oxígeno
S = porcentaje de azufre

Cantidades de desperdicios sólidos Los datos representativos de las cantidades de desperdicios sólidos y los factores que afectan su velocidad de generación se consideran brevemente en los siguientes párrafos.

Velocidades características de generación En la tabla 26-30 aparecen las velocidades unitarias características de generación de desperdicios para fuentes industriales seleccionadas. Ya que las prácticas de generación de desperdicios cambian rápidamente, la presentación de datos específicos de generación de desperdicios carece de sentido.

Factores que afectan las velocidades de generación Los factores que afectan la cantidad generada de desperdicios industriales son 1) la extensión de las operaciones de recuperación y recirculación, 2) las políticas de la empresa y 3) la legislación. La existencia de operaciones de recuperación y recirculación en una industria afecta en forma definitiva la cantidad de desperdicios recolectados. Si dichas operaciones afectan la cantidad de desperdicios generados es otro aspecto. Hasta que se disponga de más información, no se puede agregar nada definitivo al respecto. Una reducción significativa de la cantidad de desper-

kJ/kg
Libre de
humedad y
ceniza
38 374
16 700
19 271
30 516
18,240
16 648
20 032
18 738
27 615
32 720
44 082
38 216
27 316
23 224
15 316
9 848
19 542
19 500
22 858
28 493
20 892
200
1 500
....
....
31 847
17 450
17 892
G. Tchoba-

representativos de las
e afectan su velocidad
uientes párrafos.
n la tabla 26-30 apa-
generación de des-
. Ya que las prácticas
ente, la presentación
os carece de sentido.
ración Los factores
industriales son 1) la
recirculación, 2) las
encia de operaciones
afecta en forma defi-
i dichas operaciones
otro aspecto. Hasta
agregar nada defini-
cantidad de desper-

TABLA 26-29 Datos característicos del análisis final para los componentes en los desperdicios sólidos industriales, comerciales y domésticos*

Componentes	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Ceniza
Productos alimenticios						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Desperdicios de alimentos (mezclados)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Desperdicios de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Desperdicios de carnes	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Productos de papel	45.4	6.1	42.1	0.3	0.1	6.0
Cartón	43.0	5.9	44.8	0.3	0.2	5.0
Revistas	32.9	5.0	38.6	0.1	0.1	23.3
Periódico	49.1	6.1	43.0	<0.1	0.2	23.3
Papel (mezclado)	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6.0
Cartón encerado	59.2	9.3	30.1	0.1	0.1	1.2
Plásticos						
Plásticos (mezclados)	60.0	7.2	22.8	...	...	10.0
Polietileno	85.2	14.2	...	<0.1	<0.1	0.4
Poliestireno	87.1	8.4	4.0	0.2	...	0.3
Poliuretano†	63.3	6.3	17.6	6.0	<0.1	4.3
Cloruro de polivinilo†	45.2	5.6	1.6	0.1	0.1	2.0
Madera, árboles, etc.						
Desperdicios de jardín	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera verde	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Madera dura	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera (mezclada)	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.5
Virutas de madera (mezcladas)	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4
Vidrio, metales, etc.						
Vidrio y minerales‡	0.5	0.1	0.4	<0.1	...	98.9
Metales (mezclados)	4.5	0.6	4.3	<0.1	...	90.5
Cuero, hule, textiles						
Cuero (mezclado)	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Hule (mezclado)	69.7	8.7	...	...	1.6	20.0
Textiles (mezclados)	48.0	6.4	40.0	2.2	0.2	3.2
Diversos						
Desperdicios de oficinas	24.3	3.0	4.0	0.5	0.2	68.0
Aceites, pinturas	66.9	9.6	5.2	2.0	...	16.3
Combustibles derivados de los desperdicios (RFD)	44.7	6.2	38.4	0.7	<0.1	9.9

*Adaptado en parte de D. G. Wilson (ed., *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977, y G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

†El resto es cloro.

‡El contenido orgánico proviene de los recubrimientos, etiquetas y otros materiales agregados.

TABLA 26-30 Velocidades unitarias de generación de desperdicios sólidos, para fuentes industriales seleccionadas

Fuente	Unidad	Intervalo
Alimentos enlatados y congelados	Ton métricas/ton métrica de producto en crudo	0.04–0.06
Impresos y publicaciones	Ton métricas/ton métrica de papel en crudo	0.08–0.10
Industria automotriz	Ton métricas/vehículo producido	0.6–0.8
Refinería de petróleo	Ton métricas/(empleado·día)	0.04–0.05
Industria del hule	Ton métricas/ton métrica de hule en crudo	0.01–0.3

dicios sólidos generados ocurrirá siempre y cuando las empresas estén dispuestas —por voluntad propia— a conservar los recursos nacionales y a reducir las cargas económicas relacionadas con el manejo de los desperdicios sólidos. Quizá, el factor más importante que afecta la generación de ciertos tipos de desperdicios es la existencia de reglamentos federales, estatales y municipales relacionados con el uso y la colocación final de materiales específicos. Un ejemplo es la legislación sobre desperdicios peligrosos.

MANEJO, ALMACENAMIENTO Y PROCESAMIENTO EN EL SITIO

El manejo, almacenamiento y procesamiento de los desperdicios sólidos en la fuente de generación antes de recolectarlos, es el segundo de los seis elementos funcionales del sistema para el manejo de los desperdicios sólidos.

Manejo en el sitio El manejo en el sitio se refiere a las actividades relacionadas con el manejo de los desperdicios sólidos hasta que se colocan en los recipientes utilizados para su almacenamiento antes de la recolección. Dependiendo del tipo de servicio de recolección, el manejo puede requerir también que se muevan los recipientes llenos hasta el punto de recolección y se devuelvan vacíos al punto donde son almacenados entre recolecciones.

Desperdicios sólidos convencionales En la mayor parte de los edificios de oficinas, comercios e industrias, los desperdicios sólidos que se acumulan en oficinas individuales o centros de trabajo se recolectan por lo general en recipientes grandes, montados sobre rodillos. Una vez llenos, estos recipientes se mueven por medio de un elevador, si es que hay uno, y se vacían en 1) recipientes de almacenamiento

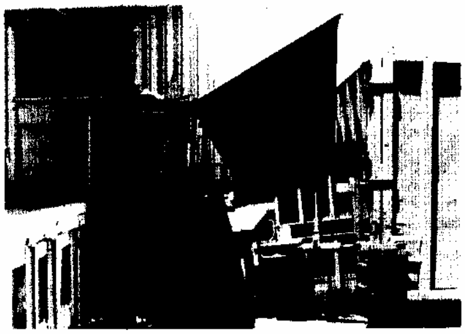


FIG. 26-40 Compactador pequeño utilizado junto con un recipiente grande portátil. Obsérvese el recipiente con ruedas, utilizado para recolectar los desperdicios en el interior de la bodega.

grandes, **2**) compactadores que se utilizan junto con los recipientes de almacenamiento (véase la Fig. 26-40), **3**) compactadores estacionarios que pueden comprimir el material en fardos o en recipientes especialmente diseñados, o **4**) otro tipo de equipo de proceso.

Desperdicios peligrosos Cuando se generan desperdicios peligrosos se suelen utilizar recipientes especiales, y personal entrenado es responsable (o debería serlo) del manejo de estos desperdicios.

Almacenamiento en el sitio Los factores a considerar para el almacenamiento en el sitio de los desperdicios sólidos incluyen: **1**) el tipo de recipiente a utilizar, **2**) la ubicación del recipiente, **3**) la salud pública y la estética, y **4**) los métodos de recolección a utilizar.

Los recipientes En buena parte, los tipos y capacidades de los recipientes utilizados dependen de las características de los desperdicios sólidos a recolectar, la frecuencia de recolección y el espacio disponible para la colocación de los recipientes.

1. *Recipientes para desperdicios convencionales* Los tipos y capacidades de los recipientes que se emplean actualmente para el almacenamiento en el sitio de los desperdicios sólidos se resumen en la tabla 26-31. Los recipientes pequeños se utilizan para las oficinas y centros de trabajo. Los recipientes de tamaño medio y grande se emplean en los sitios donde se generan grandes volúmenes.

2. *Recipientes para desperdicios peligrosos* Las prácticas de almacenamiento en el sitio son función del tipo y cantidad de los desperdicios peligrosos generados y el periodo en que ocurre la generación de dichos desperdicios. Normalmente, cuando se generan grandes cantidades se emplean instalaciones especiales que tienen capacidad suficiente para contener los desperdicios acumulados durante un periodo de varios días. Cuando sólo se generan pequeñas cantidades de desperdicios peligrosos, en forma intermitente, pueden colocarse en recipientes y almacenarse cantidades limitadas durante periodos que cubren meses o años. La información general sobre los recipientes para almacenamiento utilizados para desperdicios peligrosos y las condiciones de su empleo se presentan en la tabla 26-32.

Ubicación de los recipientes La ubicación de los recipientes en las instalaciones comerciales e industriales depende tanto de la disponibilidad de espacio como de las condiciones de acceso para servicio. En las instalaciones nuevas se han incluido áreas específicas con este propósito. A menudo, ya que los recipientes no son propiedad de la industria o el comercio, la ubicación y el tipo de los recipientes a utilizar para el almacenamiento en el sitio deben definirse en conjunto, entre la industria y la agencia de recolección pública o privada.

Procesamiento de los desperdicios sólidos en el sitio Los métodos del procesamiento en el sitio se utilizan para **1**) recuperar materiales utilizables de los desperdicios sólidos, **2**) reducir el volumen o **3**) alterar la forma física. Las operaciones más comunes de procesamiento en el sitio, aplicadas a fuentes industriales y comerciales grandes, incluyen la selección manual, la compactación y la incineración. Estas y otras operaciones de procesamiento se consideran en la parte de esta sección que trata del procesamiento y recuperación de los recursos. Los factores a considerar en la selección del equipo para el procesamiento en el sitio se resumen en la tabla 26-33.

RECOLECCIÓN DE LOS DESPERDICIOS SÓLIDOS

La información sobre la recolección, uno de los elementos funcionales más costosos, se presenta en cuatro partes que tratan sobre **1**) los tipos de servicio de recolección, **2**) los tipos de sistemas de recolección, **3**) un análisis de los sistemas de recolección y **4**) la metodología general que se utiliza para el establecimiento de las rutas de recolección.

TABLA 26-31 Datos sobre los tipos y dimensiones de los recipientes utilizados para almacenar en el sitio los desperdicios sólidos

	Capacidad			Dimensiones*	
Tipo de recipiente	Unidad	Intervalo	Característico	Unidad	Característico
De poca capacidad					
Plástico o metal (tipo oficina)	L	16–40	28	mm	(180 × 300) B × (260 × 380) T × 380 H
Plástico o metal galvanizado	L	75–150	120	mm	510 D × 660 H
Barril, plástico, aluminio o barril de fibra	L	75–250	120	mm	510 D × 669 H
Bolsas de papel para basura (estándar, resistente a las fugas, a prueba de fugas)	L	75–210	120	mm	380 W × 300 d × 1100 H
Bolsa de plástico para basura					460 W × 380 d × 1000 H
De mediana capacidad					
Con carga lateral o por la parte superior	m^3	0.75–9	3	mm	1830 W × 1070 d × 1650 H
De gran capacidad					
Abierto en la parte superior, con ruedas (también llamados cajas para desechos)	m^3	9–38	27	mm	2440 W × 1830 H × 6100 L
Utilizado con compactador estacionario	m^3	15–30	23	mm	2440 W × 1830 H × 5490 L
Equipado con mecanismo autocontenido de compactación	m^3	15–30	23	mm	2440 W × 2440 H × 6710 L
Montado sobre un remolque					
Con la parte superior abierta	m^3	15–38	27	mm	2440 W × 3660 H × 6100 L
Cerrado y equipado con mecanismo autocontenido de compactación	m^3	15–30	27	mm	2440 W × 3660 H × 7320 L

*B = fondo, T = parte superior, D = diámetro, H = altura, L = largo, W = ancho, y de = profundidad.

TABLA 26-32 D desperdicios pe

Categoría del despe
Sustancias radiactivas
Productos químicos c vos, reactivos y tóxi
Desperdicios biológic
Desperdicios inflamal
Explosivos

TABLA 26-33 F del equipo para

Factor
Capacidades
Confiabilidad
Servicio
Seguridad de operació
Facilidad de operació
Eficiencia
Efectos sobre el medio biente
Riesgos para la salud
Aspectos estéticos
Factores económicos

*Fuente: G. Tchob *Principles and Manag*

TABLA 26-32 Datos característicos sobre los recipientes utilizados para el almacenamiento y transporte de desperdicios peligrosos

Categoría del desperdicio	Recipiente: Tipo	Recipiente: Capacidad	Equipo auxiliar y condiciones de empleo
Sustancias radiactivas	Plomo recubierto con concreto Tambores de metal recubierto	Varía con el desperdicio 210 L	Edificios de almacenamiento aislados; equipo de alumbrado y grúas de gran capacidad; letreros especiales en el recipiente
Productos químicos corrosivos, reactivos y tóxicos	Tambores metálicos Tambores de metal recubierto Tanques de almacenamiento recubiertos y no recubiertos	210 L 210 L Hasta 20 m^3	Instalaciones de lavado para los recipientes vacíos; precauciones especiales para el mezclado con objeto de prevenir reacciones peligrosas; los desperdicios incompatibles se almacenan por separado
Desperdicios biológicos	Bolsas de plásticos selladas Tambores de metal recubierto	120 L	Esterilización con calor antes de embolsar; bolsas especiales para trabajo pesado con el letrero de peligro impreso en los lados
Desperdicios inflamables	Tambores metálicos Tanques de almacenamiento	210 L Hasta 20 m^3	Ventilación para los vapores y control de temperatura
Explosivos	Recipientes absorbedores de golpes	Varía	Control de temperatura y letreros especiales en el recipiente

TABLA 26-33 Factores a considerar en la evaluación del equipo para procesamiento en el sitio*

Factor	Evaluación
Capacidades	¿Qué hará el mecanismo o dispositivo? ¿Es su empleo una mejora respecto a las prácticas convencionales?
Confiabilidad	¿Realizará el equipo las funciones para las que fue diseñado con poca atención, salvo el mantenimiento preventivo? ¿Ha demostrado el equipo su eficiencia en el uso durante un periodo razonable o sólo se ha supuesto?
Servicio	¿Se requerirá en ocasiones servicio aparte del suministrado por el personal local de mantenimiento? ¿El personal de servicio disponible está adecuadamente entrenado por el fabricante del equipo o el distribuidor local?
Seguridad de operación	¿Es el equipo propuesto a prueba de tontos de manera que lo pueda operar el personal de oficinas o el arrendatario con un mínimo de conocimientos o habilidades mecánicas? ¿Tiene los dispositivos de seguridad adecuados para evitar un uso descuidado?
Facilidad de operación	¿Es el equipo fácil de operar para el arrendatario o el personal de oficinas? A menos que las funciones y operaciones reales del equipo se puedan realizar fácilmente, éstas pueden ser ignoradas por el personal a sueldo y, con más frecuencia, por los arrendatarios
Eficiencia	¿Realiza el equipo sus funciones en forma eficiente y con un mínimo de atención? En la mayor parte de los casos, se selecciona el equipo que completa un ciclo de operación cada vez que se utiliza.
Efectos sobre el medio ambiente	¿Contamina el medio ambiente el equipo utilizado? Cuando sea posible, el equipo debe reducir la contaminación del medio ambiente, en relación con sus funciones convencionales
Riesgos para la salud	El dispositivo, mecanismo o equipo utilizado ¿crea o amplía los riesgos para la salud?
Aspectos estéticos	El equipo o su arreglo ¿ofende a los sentidos? Deben realizarse esfuerzos para reducir o eliminar las imágenes o luces, olores o ruidos ofensivos
Factores económicos	¿Cuál es el costo incluido? Se deben considerar tanto el primer costo como el costo anual. Los costos futuros de operación y de mantenimiento se deben determinar con cuidado. Si todos los factores son iguales, al equipo fabricado por compañías bien establecidas y con un historial satisfactorio de operación debe dársele la consideración adecuada.

*Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

Servicios de recolección Los diferentes tipos de servicios de recolección que se utilizan actualmente para fuentes industriales y comerciales se describen en esta subsección.

Comercial-industrial El tipo de servicio de recolección proporcionado a las actividades industriales y comerciales grandes está centrado en el empleo de recipientes móviles y estacionarios grandes y compactadores estacionarios también de gran tamaño. Los compactadores son del tipo que se puede usar para comprimir directamente el material en recipientes grandes (véase la Fig. 26-40) o para formar fardos que después se colocan en los recipientes grandes.

Desperdicios peligrosos Los desperdicios peligrosos para entregarse en una planta de tratamiento o el sitio de colocación final suelen ser recolectados por el productor del desperdicio o por un recolector especializado. Característicamente, la carga de los vehículos de recolección se completa por una de las maneras siguientes: 1) los desperdicios almacenados en los tanques de gran capacidad se drenan o bombean a los vehículos de recolección, y 2) los desperdicios almacenados en tambores sellados u otros recipientes sellados se cargan a mano o mecánicamente en camiones de plataforma. Para evitar accidentes y posibles pérdidas de vidas, siempre deben asignarse dos recolectores cuando se están recolectando desperdicios peligrosos.

Tipos de sistemas de recolección Con base en la modalidad de operación, los sistemas de recolección se clasifican en dos categorías: 1) sistemas de recipientes remolcados y 2) sistemas de recipientes estacionarios.

Sistemas de recipientes remolcados (Hauled-Container Systems, HCS) Los sistemas de recolección en los cuales los recipientes utilizados para el almacenamiento de desperdicios se remolcan al sitio de procesamiento, transferencia o colocación final, se vacían y se devuelven a su ubicación original o a otro lugar, se definen como "sistemas de recipientes remolcados". En la mayor parte de estos sistemas se utiliza un solo recolector. El recolector es el responsable del manejo del vehículo, la carga de los recipientes y la descarga de los mismos, así como el vaciado del contenido de los recipientes en el sitio de colocación final. En algunos casos, por razones de seguridad, se utiliza tanto un chofer como un ayudante.

Existen tres tipos principales de sistemas de recipiente remolcado: 1) el camión de grúa o enganche, 2) el recipiente de estructura inclinable y 3) el remolcador de basura. Los datos característicos sobre estos recipientes y vehículos de recolección utilizados con estos sistemas se dan en las tablas 26-34 y 26-35, respectivamente.

1. *Sistemas con camión de enganche* Con la llegada de los vehículos de recolección tipo compactación y carga automática, los sistemas con camión de grúa o enganche se utilizan en un número limitado de casos, y los más importantes son: 1) la recolección de desperdicios en unos cuantos puntos de recolección, en los que se genera una cantidad considerable de desperdicio y 2) la recolección de

TABLA 26-34 Datos característicos sobre las capacidades de los recipientes que se utilizan en los diferentes sistemas de recolección

Recolección: Vehículo	Recolección: Tipo de recipiente	Intervalo característico de las capacidades de los recipientes,* m^3
Sistemas de recipientes remolcados		
Camión de enganche	Abierto y cubierto, también se utiliza con compactador estacionario	2–9
De estructura inclinable	Parte superior abierta; llamados también cajas para desechos	8–40
	Se utiliza junto con compactador estacionario	10–30
	Equipado con mecanismo de compactación autocontenido	15–30
Camión tractor	Remolques de basura, con la parte superior abierta	10–30
	Recipientes cerrados montados en remolques y equipados con mecanismo de compactación autocontenido	15–30
Sistemas de recipiente estacionario		
Compactador, cargado mecánicamente	Con carga lateral y la parte superior abierta o cerrada	0.6–6
Compactador, cargado manualmente	Recipientes pequeños de metal galvanizado o plástico; bolsas de papel y plástico para basura	75–200 l†

*Véase la tabla 26-31, donde aparecen las dimensiones características.
†La carga del recipiente no debe exceder 30 kg.

artículos masivos y desperdicios industriales que no son adecuados para recolectarse por medio de los vehículos de compactación.

2. *Sistemas de recipientes de estructura inclinable* Los sistemas que utilizan recipientes grandes y vehículos cargados que tienen estructura inclinable, conocidos a menudo como "cajas para tirar" (véase la Fig. 26-42), son adecuados para la recolección de todo tipo de desperdicios sólidos y basura en lugares donde la velocidad de generación garantiza el empleo de recipientes grandes. Los recipientes con la parte superior abierta se utilizan en forma rutinaria en bodegas y en sitios de construcción. Los recipientes grandes junto con los compactadores estacionarios son comunes en los servicios comerciales e industriales y en las estaciones de transferencia. Dado el gran volumen que puede ser remolcado, el empleo de los sistemas de recipientes remolcados y estructura inclinable se ha difundido especialmente entre los servicios privados de recolección para clientes industriales.

3. *Sistemas de remolcador de basura* La aplicación de los remolcadores de basura es similar a la de los sistemas de recipientes de estructura inclinable. Los remolcadores de basura son mejores para la recolección de desperdicios pesados como, por ejemplo, arena, madera y desperdicios de metal, y a menudo, se utilizan para la recolección de desperdicios de demolición en los sitios de construcción.

Sistemas de recipiente estacionario (Stationary-Container Systems, SCS) Todos los sistemas de recolección en los cuales el recipiente utilizado para el almacenamiento de los desperdicios permanece en el punto de generación del desperdicio, excepto para viajes cortos y ocasionales al vehículo de recolección, se definen como "sistemas de recipientes estacionarios". Los requerimientos de mano de obra para los sistemas de recipiente estacionario que se cargan mecánicamente son en esencia los mismos que para los sistemas de recipiente remolcado. Existen dos tipos principales de recipiente estacionario: **1)** aquellos en los que se emplean compactadores de carga automática, y **2)** aquellos en los que se utilizan vehículos cargados manualmente.

1. *Sistemas con compactadores de carga automática* El tamaño y uso del recipiente no son factores básicos en los sistemas de recipiente estacionario, que utilizan vehículos de recolección y carga automática equipados con un mecanismo de compactación (véanse la Fig. 26-43 y la tabla 26-35), como lo son en los sistemas de recipiente remolcado. Se realizan viajes al sitio de colocación final, la estación de transferencia o la estación de procesamiento después de que se ha recogido el contenido de varios recipientes, se ha compactado y el vehículo de recolección está lleno. Debido a la gran variedad de tamaños y tipos de recipientes disponible, estos sistemas se pueden utilizar para la recolección de todo tipo de desperdicios. El tamaño de los recipientes varía desde los relativamente pequeños (0.6 m^3) hasta los tamaños comparables a los utilizados con un camión de enganche (véase la Tabla 26-34).

TABLA 26-35 Datos característicos sobre los vehículos utilizados para la recolección de desperdicios sólidos

Vehículo de recolección: Tipo	Capacidades disponibles del recipiente o cuerpo del camión,* m^3	Número de ejes	Dimensiones características totales del vehículo de recolección: Con la capacidad indicada del recipiente o cuerpo del camión,* m^3	Ancho, mm	Altura, mm	Largo,* mm	Método de descarga
Sistemas de recipientes remolcados							
Camión de enganche	2–9	2	7.6	2440	2030–2540	2800–3800	Por gravedad, con abertura en el fondo
Estructura inclinable	8–40	3	22.9	2440	2030–2290	5590–7620	Por gravedad, con el extremo inclinado
Camión tractor remolcador de basura	10–30	3	30.6	2440	2290–3800	5590–11 430	Por gravedad, con el extremo inclinado
Sistemas de recipientes estacionarios							
Compactador (cargado mecánicamente)							
Carga por el frente	15–35	3	22.9	2440	3560–3800	6100–7370	Panel con eyector hidráulico
Carga lateral	6–28	3	22.9	2440	3350–3000	5590–6600	Panel con eyector hidráulico
Carga por detrás	6–24	2	15.3	2440	3175–3430	5330–5824	Panel con eyector hidráulico
Compactador (cargado manualmente)							
Carga lateral	6–28	3	28.3	2440	3350–3800	6100–7620	Panel con eyector hidráulico
Carga por atrás	6–24	2	15.3	2440	3175–3430	5330–5840	Panel con eyector hidráulico

*Del frente del camión a la parte posterior del recipiente o cuerpo del camión.

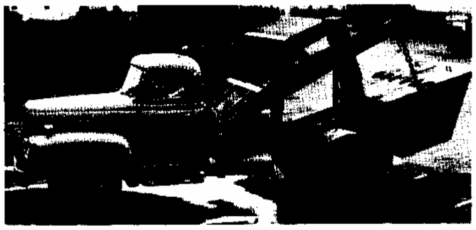


FIG. 26-41 Vehículo característico de recolección tipo camión de enganche utilizado en un sistema de recipiente remolcado.

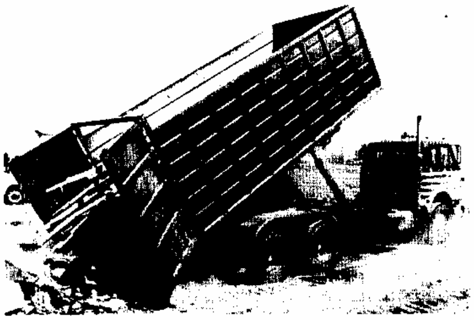


FIG. 26-42 Vehículo característico de recolección tipo estructura inclinable, utilizado en un sistema de recipiente remolcado. El recipiente que se está descargando también se conoce como caja de volteo.

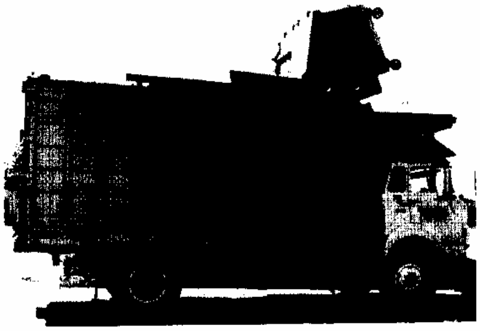


FIG. 26-43 Compactador característico con sistema de autocarga, utilizado en un sistema de recolección de recipiente estacionario.

2. *Sistemas con vehículos cargados manualmente* La principal aplicación de los métodos manuales de transferencia y de carga es la recolección de desperdicios y basura residencial. Se utilizan métodos manuales para la recolección de desperdicios industriales cuando los puntos de recolección son inaccesibles para el vehículo.

Equipo para la recolección de desperdicios peligrosos El equipo utilizado para la recolección varía según las características de los desperdicios. Para distancias cortas de arrastre se suelen preferir los métodos de almacenamiento en tambores y recolección con un camión de plataforma plana. A medida que se incrementan las distancias de arrastre, se utilizan carros tanque más grandes, remolques e incluso vagones de ferrocarril.

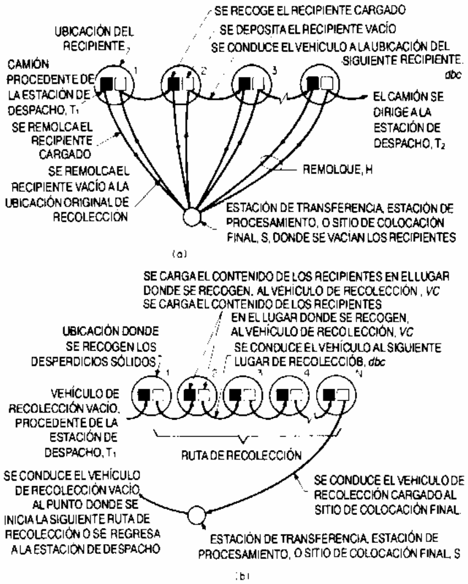


FIG. 26-44 Secuencias de operación para los sistemas de recolección de recipientes remolcados y estacionarios. *a*) Sistema de recipiente remolcado. *b*) Sistema de recipiente estacionario. (Adaptado de G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.)

Determinación de los requerimientos de vehículos y mano de obra Si se separan las actividades de recolección en operaciones unitarias, se pueden desarrollar relaciones y datos de diseño, que se utilizan para establecer los requerimientos de mano de obra y vehículos para los diferentes sistemas de recolección.

Definición de los términos Las tareas de operación para los sistemas de recipiente remolcado y recipiente estacionario se muestran esquemáticamente en la figura 26-44. Las actividades incluidas en la recolección de desperdicios sólidos se pueden agrupar en cuatro operaciones unitarias: **1)** recolección, **2)** arrastre, **3)** en el sitio y **4)** fuera de ruta.

1. *Recolección* La definición del término "recolección" (*Pickup P*) depende del tipo de sistema de recolección utilizado.

a. Para sistemas de recipiente remolcado (véase la Fig. 26-44*a*). La recolección (P_{hcs}) se refiere al tiempo que requiere la recolección del recipiente lleno, el tiempo que se necesita para redepositar el recipiente después de que se ha vaciado y el tiempo que precisa conducir al siguiente recipiente.

b. Para sistemas de recipiente estacionario (véase la Fig. 26-44*b*), la recolección (P_{scs}) se refiere al tiempo que requiere el vehículo desde que carga el contenido del primer recipiente hasta que ha sido cargado el contenido del último recipiente a vaciar.

2. *Arrastre* La definición del término "arrastre" (*haul, h*) también depende del tipo de sistema de recolección utilizado.

a. Para sistemas de recipiente remolcado, el arrastre representa el tiempo requerido para llegar al sitio de depósito final, comenzando después de que un recipiente cuyo contenido se va a vaciar ha sido cargado al camión, al cual se suma el tiempo después de salir del sitio de colocación final, hasta que el camión llegue a la ubicación donde el recipiente vacío se va a redepositar. No incluye el tiempo que pasa el vehículo en el sitio de colocación final.

b. Para sistemas de recipiente estacionario, el arrastre se refiere al tiempo requerido para llegar al sitio de colocación final, comenzando después de que el último recipiente en la ruta se ha vaciado o se ha llenado el vehículo de recolección, al cual se suma el tiempo después de dejar el sitio de colocación final, hasta que el vehículo llega a la ubicación del primer contenedor a vaciar, en la siguiente ruta de recolección. No incluye el tiempo que el vehículo pasó en el sitio de colocación final.

3. *En el sitio* La operación unitaria en el sitio (s) se refiere al tiempo que pasa el vehículo en el sitio de colocación final e incluye el tiempo empleado en esperar la descarga, así como el tiempo que se utiliza en la descarga.

4. *Fuera de ruta* La operación unitaria fuera de ruta (*off route*, W) incluye todo el tiempo utilizado en las actividades no productivas, desde el punto de vista de la operación global de recolección. El tiempo necesario fuera de la ruta incluye: **1)** el tiempo empleado en verificar la entrada y salida por la mañana y al final del día, **2)** el tiempo perdido debido a las inevitables congestiones de tráfico, y **3)** el tiempo utilizado en las reparaciones y mantenimiento del equipo, etc. El tiempo fuera de ruta innecesario incluye el tiempo destinado a la comida que sobrepasa al tiempo establecido para comer, y el tiempo que se emplea en pausas no autorizadas para tomar café, conversar con los amigos, etc.

Sistemas de recipiente remolcado. El tiempo requerido por viaje, que también corresponde al tiempo requerido por recipiente, es igual a la suma de los tiempos de recolección en el sitio y de arrastre, así como de un factor que considera las actividades fuera de ruta y está dado por la siguiente ecuación.

$$T_{hcs} = (P_{hcs} + s + a + bx)/(1 - W) \qquad (26\text{-}5)$$

donde T_{hcs} = tiempo por viaje para el sistema de recipiente remolcado, h/viaje.
P_{hcs} = tiempo de recolección por viaje para sistema de recipiente remolcado, h/viaje.
s = tiempo en el sitio por viaje, h/viaje
a = constante de arrastre empírica, h/viaje
b = constante de arrastre empírica, h/km
x = distancia de arrastre del viaje redondo, km/viaje
W = factor fuera de ruta, expresado como una fracción.

El tiempo de recolección por viaje P_{hcs} es igual a

$$P_{hcs} = pc + uc + dbc \qquad (26\text{-}6)$$

donde P_{hcs} = tiempo de recolección por viaje, h/viaje
pc = tiempo requerido para levantar el recipiente cargado, h/viaje
uc = tiempo requerido para bajar el recipiente vacío, h/viaje

TABLA 26-36 Valores característicos para los coeficientes de las constantes de remolque *a* y *b* en las ecuaciones (26-5), (26-7), (26-8) y (26-12)

Límite de velocidad, km/h (mi/h)	*a*, h/viaje	b, h/km (h/mi)
88 (55)	0.016	0.011 (0.018)
72 (45)	0.022	0.014 (0.022)
56 (35)	0.034	0.018 (0.029)
40 (25)	0.050	0.025 (0.040)

dbc = tiempo promedio que se gasta en conducir el vehículo entre las ubicaciones de los recipientes, h/viaje (determinado localmente).

El número de viajes por día que puede hacer un vehículo con el sistema de recipientes remolcados se determina utilizando la ecuación (26-7)

$$N_d = [(1 - W)H - (t_1 + t_2)]/(P_{hcs} + s + a + bx) \qquad (26\text{-}7)$$

donde N_d = número de viajes por día, viaje/día
H = longitud del día de trabajo, h/día
t_1 = tiempo que requiere el camión para ir de la cochera a la ubicación del primer recipiente, h
t_2 = tiempo tomado por el camión para ir de la ubicación del último recipiente a la cochera, h.

Los demás términos se definieron previamente.

Los datos a utilizar para la solución de las ecuaciones (26-6) y (26-7) para los diferentes tipos de sistemas de recipiente remolcado se dan en las tablas 26-36 y 26-37. El factor de fuera de ruta de la ecuación (26-7) varía desde 0.10 hasta 0.25; en la mayor parte de las operaciones un factor de 0.15 es representativo.

Sistemas de recipientes estacionarios Para los sistemas que utilizan compactadores con autocarga mecánica, el tiempo por viaje es

$$T_{scs} = (P_{scs} + s + a + bx)/(1 - W) \qquad (26\text{-}8)$$

donde T_{scs} = tiempo por viaje para los sistemas de recipiente estacionario, h/viaje
P_{scs} = tiempo de recolección por viaje para el sistema de recipientes estacionarios, h/viaje

Los demas términos se definieron previamente.

El tiempo de recolección para los sistemas de recipiente estacionario está dado por:

$$P_{scs} = C_t(uc) + (n_p - 1)(dbc) \qquad (26\text{-}9)$$

donde P_{scs} = tiempo de recolección por viaje para los sistemas de recipiente estacionario, h/viaje
C_t = Número de recipientes vaciados por viaje, recipiente/viaje.

TABLA 26-37 Datos característicos para el cálculo del equipo y los requerimientos de mano de obra, para los sistemas de recolección de recipiente remolcado y estacionario

Recolección: Vehículo	Método de descarga	Razón de compactación, *r*	Se recoge el recipiente cargado y se deposita el vacío, h/viaje*	Se vacía el contenido del recipiente cargado, h/recipiente†	Tiempo en el sitio, *s*, h/viaje
Sistemas de recipiente remolcado					
Camión de enganche	Mecánico	....	0.067	....	0.053
Estructura inclinable	Mecánico	....	0.40	....	0.127
Estructura inclinable	Mecánico	2.0–4.0‡	0.40	....	0.133
Sistemas de recipiente estacionario					
Compactador	Mecánico	2.0–4.0		0.050	0.10
Compactador	Manual	2.0–4.0		....	0.10

*$pc + uc$ en la ecuación (26-6).
†uc en la ecuación (26-9).
‡Recipientes utilizados junto con el compactador estacionario (véase la Fig. 26-40).

uc = tiempo promedio de descarga por recipiente para el sistema de recipientes estacionarios, h/recipiente.

n_p = número de ubicaciones de recolección de recipientes por viaje, ubicaciones/viaje

dbc = tiempo promedio gastado en conducir el vehículo entre las ubicaciones de los recipientes, h/ubicación (determinado localmente)

El término $(n_p - 1)$ que considera el hecho de que el número de veces que el vehículo de recolección tiene que ser conducido entre ubicaciones de los recipientes es igual al número de ubicaciones de recipientes menos 1.

El número de recipientes que pueden ser vaciados por viaje de recolección está relacionado directamente con el volumen del vehículo de recolección y la razón de compactación que se puede lograr. Este número está dado por:

$$C_t = vr/(cf) \qquad (26\text{-}10)$$

donde C_t = número de recipientes vaciados por viaje, recipiente/viaje.

v = volumen del vehículo de recolección, m^3/viaje.

r = razón de compactación

c = volumen del recipiente, m^3/recipiente.

f = factor ponderado de uso del recipiente.

El número de viajes requeridos por día está dado por:

$$N_d = V_d/(vr) \qquad (26\text{-}11)$$

donde N_d = número de viajes de recolección requeridos por día, viajes/día.

V_d = velocidad de generación del desperdicio por día, m^3/día.

Los otros términos ya se definieron previamente.

Cuando a diario se va a realizar un número determinado de viajes, se puede determinar la combinación adecuada de los viajes por día y las dimensiones del vehículo por medio de la ecuación (26-12), junto con un análisis económico:

$$H = [(t_1 + t_2) + N_d(P_{scs} + s + a + bx)]/(1 - W) \qquad (26\text{-}12)$$

donde N_d = número de viajes de recolección por día, viajes/día, y los demás términos se definieron previamente.

Para determinar el volumen requerido del camión, dos o tres valores diferentes de N_d se sustituyen en la ecuación (26-12) y se determinan los tiempos disponibles para recolección por viaje. A continuación, por el método de prueba y error, se determina el volumen requerido para cada valor de N_d, utilizando las ecuaciones (26-9) y (26-10). Con base en las dimensiones de los camiones disponibles se selecciona el que más se acerque al valor calculado. Si las dimensiones de los camiones disponibles son más pequeñas que los valores requeridos, se calcula el tiempo real por día que se requerirá al utilizar estos camiones. Entonces, se puede seleccionar la combinación más eficaz de costos.

Rutas de recolección Una vez determinados los requerimientos de equipo y mano de obra, deben establecerse las rutas de recolección para que tanto la fuerza de trabajo como el equipo se utilicen en forma adecuada. En general, el trazado o diseño de las rutas de recolección se realiza por el proceso de prueba y error; no hay reglas fijas que se puedan aplicar a todas las situaciones.

Algunos de los factores a considerar al establecer las rutas son los siguientes: **1)** deben identificarse las políticas y reglamentos de la compañía relacionados con aspectos tales como, por ejemplo, el punto de recolección y la frecuencia de ésta, **2)** deben coordinarse las condiciones existentes del sistema, como tipos de vehículos y dimensiones de las cuadrillas, **3)** los desperdicios generados en lugares donde hay congestión de tráfico deben recolectarse tan temprano como sea posible, **4)** las fuentes donde se generan grandes cantidades de desperdicios debe recolectarse durante la primera parte del día, **5)** si es posible, los puntos aislados de recolección donde se generen pequeñas cantidades de desperdicios sólidos, y que reciben la misma frecuencia de recolección deben ser atendidos durante un viaje o en el mismo día.

Diseño de rutas El diseño de las rutas de recolección es un proceso de cuatro etapas: en primer lugar, se preparan los mapas de localización. En un mapa de escala relativamente grande del área industrial, los siguientes datos deben ubicarse para cada punto de recolección de desperdicios sólidos: la localización, el número de recipientes, la frecuencia de recolección y, si se emplea un sistema de recipientes estacionarios con compactadores autocargados, la cantidad estimada de desperdicios a recolectar en cada estación de recolección. Segundo, prepárese un resumen de los datos. Estímese la cantidad de desperdicios a recolectar de las estaciones a las cuales se da servicio diario y en las cuales se va a realizar la operación de recolección. Cuando se utilice un sistema de recipientes estacionarios, también debe determinarse el número de estaciones a las que se dará servicio en cada ciclo de recolección. Tercero, trácense las rutas preliminares de recolección, empezando por la estación de despacho o el lugar donde se estacionan los vehículos de recolección. Debe trazarse una ruta que enlace todas las estaciones de recolección a las que se va a dar servicio diario. Esta ruta debe trazarse de tal forma que la última estación esté lo más cerca posible del sitio de colocación final. Cuarto, desarróllense rutas equilibradas. Después de trazar las rutas preliminares de recolección, debe determinarse la distancia de arrastre para cada ruta. A continuación, determínense los requerimientos de mano de obra por día y verifíquense contra las horas disponibles de trabajo por día. En ocasiones puede ser necesario reajustar las rutas de recolección para equilibrar la carga de trabajo y la distancia recorrida. Después de que las rutas equilibradas se han establecido, deben trazarse sobre el mapa maestro.

Horarios Debe prepararse un horario maestro de cada ruta de recolección para su utilización por el departamento de ingeniería y el despachador de transportes. Además debe prepararse un horario de cada ruta para el conductor del vehículo, en el que se encuentre la localización y orden de cada punto de recolección a servir. Asimismo, se debe mantener una bitácora para cada conductor.

TRANSFERENCIA Y TRANSPORTE

El elemento funcional de transferencia y transporte son los medios, instalaciones y accesorios utilizados para efectuar la transferencia de los desperdicios, desde vehículos de recolección relativamente pequeños hasta vehículos mayores que los transportarán grandes distancias hasta los centros de procesamiento o a los sitios de colocación final. Las operaciones de transferencia y transporte se vuelven necesarias cuando las distancias de arrastre a los sitios disponibles de colocación final o a los centros de procesamiento se incrementan hasta un punto en el cual el arrastre directo no es económico.

Estaciones de transferencia Los factores importantes a considerar en el diseño de las estaciones de transferencia incluyen **1)** el tipo de operación de transferencia a utilizar, **2)** los requerimientos de capacidad, **3)** los requerimientos de equipo y accesorios, y 4) los requerimientos del medio ambiente.

Tipos de estaciones de transferencia Dependiendo del método que se utilice para cargar los vehículos de transporte, las estaciones de transferencia se pueden clasificar en tres tipos: 1) de descarga directa, **2)** de descarga y almacenamiento, y **3)** una combinación de descarga directa y descarga con almacenamiento.

1. *Descarga directa* En una estación de transferencia de descarga directa, los desperdicios de los vehículos de recolección se suelen vaciar directamente al vehículo que se va a utilizar para transportarlos al lugar de su colocación final. Para lograr lo anterior, estas estaciones de transferencia se construyen por lo general con un arreglo a dos niveles. Cuando la plataforma de descarga de la cual los desperdicios de los vehículos de recolección son descargados en los remolcadores de transferencia está elevada, o si los remolcadores de transporte se localizan en una rampa inclinada (véase la Fig. 26-45). Las estaciones de

FIG. 26-45 Estación de transferencia con descarga directa, para remolcadores con la parte superior abierta, colocados en una rampa deprimida, debajo de las tolvas de carga.

transferencia con descarga directa que utilizan compactadores estacionarios también son populares.

2. *Descarga y almacenamiento* En la estación de transferencia con descarga y almacenamiento, los desperdicios se vacían en un foso de almacenamiento o en una plataforma desde la cual se cargan los vehículos de transporte por medio de varios tipos de equipo auxiliar. En estas estaciones, el volumen de almacenamiento varía desde aproximadamente medio día hasta dos días de volumen de desperdicios.

3. *Combinación de descarga directa y descarga con almacenamiento* En algunas estaciones de transferencia se utilizan los métodos de descarga directa y de descarga y almacenamiento. Por lo general, estas estaciones tienen propósitos múltiples y están concebidas para servir a mayor número de usuarios que una estación con un solo propósito. Además de servir a mayor número de usuarios, una estación de transferencia con propósitos múltiples puede incluir la operación de recuperación de materiales.

Requerimiento de capacidad La capacidad de operación de una estación de transferencia debe ser tal que los vehículos de recolección no tengan que esperar mucho tiempo para descargar. En la mayor parte de los casos, no es eficaz desde el punto de vista de costos diseñar una estación para manejar el número máximo de cargas por hora. Debe hacerse un análisis económico comparativo entre el costo anual del tiempo empleado por los vehículos de recolección que esperan descargar contra el incremento anual de costos de una estación de transferencia más grande y/o el empleo de más equipo de transporte. Debido al costo incrementado del equipo de transporte, debe hacerse un análisis comparativo entre la capacidad de la estación de transferencia y el costo de la operación de transporte, que incluye tanto los componentes de equipo como de mano de obra.

Requerimientos de equipo y accesorios El tipo y cantidad de equipo requerido varía con la capacidad de la estación y su función en el sistema de manejo de desperdicios. Específicamente, deben proporcionarse escalas en las estaciones de transferencia grandes y las de tamaño intermedio, tanto para monitorear la operación como para desarrollar datos significativos de ingeniería y administración.

Requerimientos del medio ambiente La mayor parte de las estaciones modernas de transferencia son cerradas y están construidas con materiales que se pueden mantener y limpiar fácilmente. Para las estaciones de transferencia con descarga directa y áreas de carga abiertas, se debe prestar especial atención al problema de los papeles que se lleva el viento. Generalmente se utilizan pantallas contra el viento u otras barreras. Con independencia del tipo, la estación debe diseñarse y construirse de tal manera que en todas las áreas accesibles se eliminen los sitios donde pueden acumularse basura o papeles.

Medios y métodos de transferencia Los vehículos con motor, los ferrocarriles y los transportes marítimos son los medios que más se utilizan para transportar los desperdicios sólidos. También se han utilizado los sistemas hidráulicos o neumáticos; también existen otros sistemas sugeridos, la mayor parte de los cuales no se han probado.

Transporte por medio de vehículos con motor Los vehículos con motor para transportar los desperdicios sólidos por carretera deben satisfacer los siguientes requerimientos: **1)** los desperdicios deben transportarse con un costo mínimo, **2)** los desperdicios deben estar cubiertos durante la operación de arrastre, **3)** los vehículos deben diseñarse para el tránsito por carretera, **4)** la capacidad del vehículo debe ser tal que no se excedan los límites de peso permitido, **5)** los métodos utilizados para descargar deben ser simples y confiables. El volumen máximo que puede remolcarse en los vehículos de transporte por carretera deben ajustarse a los reglamentos existentes en el estado en que se opera.

1. *Remolques y semirremolques* En años recientes, debido a su sencillez y confiabilidad, los remolques y semirremolques descubiertos han encontrado gran aceptación (véanse la tabla 26-38 y la Fig. 26-45). Para elevar al máximo la carga comercial, los remolques se diseñan a menudo más altos que el límite legal cuando están vacíos y más bajos cuando están llenos. Algunos remolques están equipados con fosos para recolectar cualquier líquido que se acumule de los desperdicios sólidos. Los fosos están equipados con drenajes para que se puedan vaciar en el sitio de colocación final.

Los métodos utilizados para descargar los remolques de transporte se pueden clasificar como 1) de vaciado automático, y 2) el que requiere la ayuda de equipo auxiliar. Los remolques de vaciado automático están equipados con mecanismos como lechos hidráulicos de descarga, diafragmas motrices y pisos móviles, que son parte del vehículo. Los pisos móviles son una adaptación del equipo utilizado en la industria de la construcción. Una ventaja de los remolques con pisos móviles es la rapidez de descarga (característicamente, 6 a 10 min) lograda en el sitio de colocación final sin necesidad de equipo auxiliar. Los sistemas de descarga que requieren equipo auxiliar son generalmente del tipo "jalador" en el cual los desperdicios son sacados del camión por medio de una mampara móvil o eslingas de cable de alambre colocadas delante de la carga (véase la Fig. 26-46). La desventaja del equipo auxiliar requerido y la fuerza de trabajo en el sitio de colocación final para descargar es relativamente menor, en virtud de la sencillez y confiabilidad del método.

Otro sistema de descarga auxiliar que ha demostrado ser eficaz y eficiente incluye el empleo de rampas móviles operadas hidráulicamente y situadas en el sitio de colocación final (véase la Fig. 26-47).

TABLA 26-38 Datos característicos sobre vehículos remolcados, utilizados en las estaciones de transferencia

	Capacidad por remolque		Dimensiones de un solo remolque			
Tipo	m^3	Ton métricas	Ancho, m	Largo, m	Altura aproximada del remolque vacío, m	Longitud del tractor y remolque, m*
Tractor-remolque-remolque†	54	11.4	2.44	8.25	4.12	19.8
Tractor-remolque	54	10.0	2.44	8.50	4.12	18.3
	74	17.3	2.44	12.2	4.12	
Tractor-remolque-compactador	58	18	2.44	10.2	4.12	14.0

*La longitud total varía con el tipo de tractor (es decir, convencional o cabina) y el radio de giro de los remolques.
†Las dimensiones son para la combinación de tractor-remolque-remolque, mostrada en la figura 26-47.

FIG. 26-46 Descarg
jalador con cables.

FIG. 26-47 Descar
por medio de rampas

Desde el punto de
nación de tractor
rampas y la combi
gunda rampa. La p
se inclinan hacia a
El tiempo requerid
damente 5 minuto
2. *Compactad*
pientes de gran ca
compactadores es
compactación es p
están equipados co
vil utilizada para c
descargarlos.
Transporte por
ferrocarriles para
dad sólo se emplea
está desarrollando
les para el arrastre
remotas en donde
de ferrocarril.
Transporte por
nes, barcazas y bo
lidos a los lugares
en el océano, pero
Estados Unidos. S
toimpulsados (co
otros botes especi
lizar transportes a
de embarcaciones
Transporte ne
baja presión como

ayor parte de las es-
y están construidas
fácilmente. Para las
áreas de carga abier-
le los papeles que se
is contra el viento u
ción debe diseñarse
accesibles se elimi-
papeles.
hículos con motor,
s medios que más se
También se han uti-
mbién existen otros
o se han probado.
Los vehículos con
r carretera deben sa-
rdicios deben trans-
deben estar cubier-
los deben diseñarse
vehículo debe ser tal
5) los métodos utili-
es. El volumen má-
nsporte por carrete-
el estado en que se

cientes, debido a su
molques descubier-
a 26-38 y la Fig. 26-
remolques se dise-
están vacíos y más
stán equipados con
mule de los desper-
ijes para que se pue-

lques de transporte
o, y 2) el que requie-
vaciado automático
ráulicos de descar-
parte del vehículo.
tilizado en la indus-
s con pisos móviles
10 min) lograda en
auxiliar. Los siste-
n generalmente del
dos del camión por
alambre colocadas
ntaja del equipo au-
de colocación final
e la sencillez y con-

ostrado ser eficaz y
peradas hidráulica-
éase la Fig. 26-47).

de

l del trac-
molque,
l*
.8
.3
.0

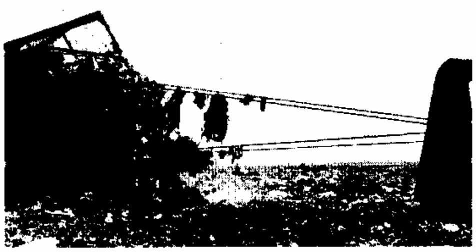


FIG. 26-46 Descarga de desperdicios de un remolque por medio de un sistema jalador con cables.

FIG. 26-47 Descarga de desperdicios de un remolque y un tractor remolque, por medio de rampas inclinables operadas hidráulicamente.

Desde el punto de vista de operación, el semirremolque de una combinación de tractor con dos remolques, entra en reversa en una de las rampas y la combinación tractor-remolque entra en reversa en la segunda rampa. La parte trasera de los remolques se abre y las unidades se inclinan hacia arriba hasta que los desperdicios caen por gravedad. El tiempo requerido para toda la operación de descarga es aproximadamente 5 minutos por viaje.

2. *Compactadores* En las estaciones de transferencia, los recipientes de gran capacidad y los remolques se utilizan junto con los compactadores estacionarios. En algunos casos, el mecanismo de compactación es parte integral del recipiente. Cuando los recipientes están equipados con un mecanismo de compactación, la mampara móvil utilizada para comprimir los desperdicios también se emplea para descargarlos.

Transporte por ferrocarril A pesar de que antes se utilizaban los ferrocarriles para el transporte de desperdicios sólidos, en la actualidad sólo se emplean en algunas cuantas comunidades. Sin embargo, se está desarrollando un renovado interés en el empleo de los ferrocarriles para el arrastre de desperdicios sólidos, especialmente hacia áreas remotas en donde el transporte por carretera es difícil y existen líneas de ferrocarril.

Transporte por vías acuáticas En el pasado se utilizaron lanchones, barcazas y botes especiales para el transporte de desperdicios sólidos a los lugares de procesamiento y a los sitios de colocación final en el océano, pero la colocación final en el océano ya no se practica en Estados Unidos. Sin embargo, se han utilizado algunos transportes autoimpulsados (como los lanchones de la marina de Estados Unidos y otros botes especiales). En la actualidad, la práctica más común es utilizar transportes arrastrados por remolcadores o por otro tipo especial de embarcaciones.

Transporte neumático Se han utilizado tanto el sistema de aire a baja presión como el sistema al vacío para el transporte de desperdicios sólidos. La aplicación más común es el transporte de desperdicios procedentes de las actividades comerciales o los apartamentos a una ubicación central para su procesamiento o para su carga en los vehículos de transporte. El sistema neumático más grande que se utiliza actualmente en Estados Unidos está en el parque de diversiones Walt Disney World, en Orlando, Florida.

Localización de las estaciones de transferencia Siempre que sea posible, las estaciones de transferencia deben localizarse: **1)** tan cerca como se pueda del centro de depósito de las materias individuales de producción de desperdicios sólidos a servir, **2)** en los sitios de fácil acceso a las principales carreteras, así como en las cercanías de los medios secundarios o complementarios de transporte, **3)** donde haya un mínimo de objeción pública a la operación de transferencia, y **4)** donde la construcción y operación sea lo más económica. Además, si el sitio de la estación de transferencia va a emplearse para las operaciones de procesamiento que incluyen recuperación de materiales y/o producción de energía, deben considerarse los requerimientos para estas operaciones.

Transferencia y transporte de desperdicios peligrosos Las instalaciones de estaciones de transferencia para desperdicios peligrosos son muy diferentes de aquellas que se encuentran en una estación de transferencia de desperdicios sólidos municipales o industriales. Característicamente, los desperdicios peligrosos no se compactan (reducción mecánica del volumen) ni se descargan a niveles diferenciales, o son recolectados por varias compañías. En su lugar, los desperdicios líquidos peligrosos se bombean por lo general de los vehículos de recolección y los sólidos o sedimentos se cargan, sin sacarlos de los recipientes de recolección, para su transporte a las instalaciones de procesamiento o de colocación final.

No es común encontrar una instalación de transferencia de desperdicios peligrosos en la cual éstos se transfieran a grandes vehículos de transporte. Las instalaciones de procesamiento y almacenamiento suelen ser parte de la secuencia de manejo de materiales en la estación de transferencia. Por ejemplo, la neutralización de desperdicios corrosivos da por resultado el empleo de vehículos de transporte o carros tanque de menor costo.

PROCESAMIENTO Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS

El objeto de esta subsección es introducir al lector a las técnicas y métodos utilizados para recuperar materiales, productos de la conversión y obtener energía de los desperdicios sólidos. Los puntos a considerar incluyen: **1)** técnicas de procesamiento, **2)** técnicas de procesamiento para desperdicios peligrosos, **3)** sistemas de recuperación de materiales, **4)** recuperación de productos de conversión biológica, **5)** recuperación de productos de conversión química y **6)** recuperación de energía a partir de los productos de conversión.

Dado que muchas de las técnicas, especialmente las relacionadas con la recuperación de materiales y energía y el procesamiento de desperdicios peligrosos están en estado de flujo con respecto a los criterios de aplicación y de diseño, el objetivo es aquí exclusivamente presentarlas al lector. Si estas técnicas se consideran para el desarrollo de sistemas de manejo de desperdicios, se deben obtener datos actuales sobre el comportamiento y para el diseño de ingeniería, con base en los registros de operación de las instalaciones y a partir de las pruebas de campo, así como de los fabricantes del equipo y de la literatura disponible.

Técnicas de procesamiento Las técnicas de procesamiento se utilizan en los sistemas de manejo de desperdicios sólidos para **1)** mejorar la eficiencia de los sistemas, **2)** recuperar los recursos (los materiales utilizables), y **3)** para preparar los materiales para la recuperación de los productos de conversión y la energía. Las técnicas más importantes utilizadas para el procesamiento de los desperdicios sólidos se resumen en la tabla 26-39.

Separación manual de los componentes La separación manual de los componentes de los desperdicios sólidos se puede realizar en la

TABLA 26-39 Resumen de las técnicas utilizadas para el procesamiento de los desperdicios sólidos

Técnicas de procesamiento	Función	Equipo y/o instalaciones representativas y sus aplicaciones
Separación manual de los componentes	Separación de materiales recuperables, generalmente en el punto de generación	
Almacenamiento y transferencia	Almacenamiento y transferencia de los desperdicios a procesar	Almacenamiento en fosos abiertos para los desperdicios no procesados; almacenamiento en cajones o silos para los desperdicios procesados; equipo de transferencia que incluye transportadores de metal y banda de hule, transportadores vibratorios para los desperdicios no procesados; transportadores neumáticos y de tornillo para los desperdicios procesados
Reducción mecánica del volumen	Reducción del volumen de los desperdicios sólidos; alteración de la forma de los componentes de los desperdicios sólidos; todos los vehículos modernos de recolección están equipados con compactadores	Compactadores hidráulicos tipo pistón para los vehículos de recolección; compactadores en el sitio y en la estación de transferencia; quebradora de rodillos, utilizados para triturar los materiales quebradizos y aplastar las latas de estaño y aluminio, así como otros materiales dúctiles
Reducción química del volumen	Reducción del volumen de los desperdicios sólidos mediante su combustión (incineración)	Incineradores de quemado masivo, con y sin recuperación de calor, para los desperdicios no procesados
Alteración mecánica de los componentes	Alteración del tamaño y la forma de los componentes de los desperdicios sólidos	Equipo utilizado para reducir el tamaño de los desperdicios sólidos, que incluye molinos de martillos, desmenuzadores, quebradoras de rodillos, pulverizadores, quebradoras de quijada, molinos raspadores y reductores hidráulicos de pulpa
Separación mecánica de los componentes	Separación de los materiales recuperables, generalmente en la instalación del procesamiento	(Véase la tabla 26-40)
Separación electromecánica y magnética	Separación de los materiales ferrosos y no ferrosos de los desperdicios sólidos procesados	Separación magnética para los materiales ferrosos; separación por corrientes parásitas para el aluminio; separación electrostática para el vidrio contenido en los desperdicios libres de desechos ferrosos y de aluminio; separación por fluido magnético para los materiales no ferrosos contenidos en los desperdicios procesados
Secado y eliminación de agua	Eliminación de la humedad que contienen los desperdicios sólidos	Secadores por convección, conducción y radiación, utilizados para los desperdicios sólidos y los sedimentos; centrifugación y filtración, utilizados para eliminar el agua en la planta de tratamiento de sedimento

fuente donde se generaron, en la estación de transferencia, en la estación de procesamiento central o en el sitio de colocación final. La separación manual en la fuente de generación es el método más adecuado para lograr la recuperación y reutilización de los materiales. El número y tipo de componentes recuperados o separados (es decir, cartón y papel de alta calidad, metales y madera) dependen de la ubicación, las oportunidades para reciclaje y el mercado de reventa.

Almacenamiento y transferencia Cuando los desperdicios sólidos son procesados para la recuperación de materiales, deben considerarse instalaciones de almacenamiento y transferencia como parte esencial de la operación de procesamiento. Factores importantes en el diseño de dichas instalaciones incluyen: **1)** el tamaño del material antes y después del procesamiento, **2)** la densidad del material, **3)** el ángulo de reposo antes y después del procesamiento, **4)** las características abrasivas del material y **5)** el contenido de humedad.

Reducción mecánica del volumen La reducción mecánica del volumen es quizá el factor más importante en el desarrollo y la operación de los sistemas de manejo de desperdicios sólidos. Los vehículos equipados con mecanismos de compactación se utilizan para la recolección de la mayor parte de los desperdicios sólidos industriales. Para incrementar la vida útil de los rellenos de tierra, se compactan los desperdicios. El papel para reciclaje se embarca en fardos a los centros de procesamiento. Al compactar los desperdicios sólidos industriales se ha descubierto que la densidad final (característicamente, 1100 kg/m^3) es la misma, independientemente de la densidad inicial y la presión aplicada. Este hecho es importante para evaluar las reglamentaciones de los fabricantes.

Reducción química del volumen La incineración ha sido el método más utilizado para reducir el volumen de los desperdicios por métodos químicos. Una de las características más atractivas del proceso de incineración es que puede utilizarse para reducir el volumen original de los desperdicios sólidos combustibles en aproximadamente 80 a 90%. A pesar de que la tecnología de incineración ha avanzado desde 1960, el control de la contaminación del aire y el costo siguen siendo los principales problemas para su puesta en práctica.

Alteración mecánica del tamaño El objeto de la reducción del tamaño es obtener un producto final que sea razonablemente uniforme y bastante más reducido en su tamaño, en comparación con su forma original. Es importante observar que la reducción de tamaño no implica necesariamente reducción de volumen. En algunas situaciones, el volumen total del material después de su reducción puede ser mayor que su volumen original.

Separación mecánica de los componentes La separación de los componentes es una operación necesaria para la recuperación de los recursos de los desperdicios sólidos y, en algunos casos, para la obtención de energía y productos de conversión que van a recuperarse de los desperdicios procesados. Las técnicas de separación mecánica que se han utilizado se encuentran resumidas en la tabla 26-40.

Separación magnética y electromecánica La separación magnética de los materiales ferrosos es una técnica bien establecida. Recientemente, se han desarrollado muy diversas técnicas electromecánicas para la eliminación de varios materiales no ferrosos (véase la tabla 26-39).

Secado y deshidratación En muchos sistemas de recuperación de energía a partir de los desperdicios sólidos y de incineración, la porción ligera desmenuzada se somete a un presecado para disminuir su peso. A pesar de que los requerimientos de energía para el secado de desperdicios varía de acuerdo con las condiciones locales, la energía requerida se puede estimar en aproximadamente 4300 kj/kg de agua evaporada.

Procesamiento de desperdicios peligrosos Al igual que con los desperdicios sólidos convencionales, el procesamiento de los desperdicios peligrosos se realiza con tres propósitos: **1)** la recuperación de materiales útiles, **2)** reducción de la cantidad de desperdicios que se colocarán en los rellenos de tierra, y **3)** preparación de los desperdicios para su colocación final.

Técnicas de procesamiento El procesamiento de los desperdicios peligrosos en una base intermitente se puede realizar por medios físicos, químicos, térmicos y biológicos. Los diferentes procesos individuales en cada categoría se resumen en la tabla 26-41. Se observa claramente que el número de combinaciones posibles de los procesos de

os
 aplicaciones

dicios no proce-
los desperdicios
transportadores
atorios para los
eumáticos y de

hículos de reco-
n de transferen-
ar los materiales
minio, así como

eración de calor,

rdicios sólidos,
res, quebradoras
da, molinos ras-

; separación por
n electrostática
res de desechos
gnético para los
rdicios procesa-

, utilizados para
ugación y filtra-
 de tratamiento

la reducción del ta-
blemente uniforme
ación con su forma
le tamaño no impli-
unas situaciones, el
n puede ser mayor

a separación de los
ecuperación de los
asos, para la obten-
 recuperarse de los
ón mecánica que se
6-40.
separación magné-
ablecida. Reciente-
ctromecánicas para
e la tabla 26-39).
de recuperación de
cineración, la por-
 para disminuir su
a para el secado de
 locales, la energía
1300 kJ/kg de agua

Al igual que con los
ento de los desper-
la recuperación de
esperdicios que se
de los desperdicios

de los desperdicios
ar por medios físi-
s procesos indivi-
41. Se observa cla-
de los procesos de

TABLA 26-40 Métodos mecánicos utilizados para la separación de los componentes de los desperdicios sólidos

Método	Función	Equipo y/o instalaciones y sus aplicaciones
Cribado	Utilizado para separar los componentes de los desperdicios sólidos por tamaño	Mallas vibratorias, horizontales y zarandas para los desperdicios procesados y no procesados; mallas de disco para los desperdicios procesados
Separación con aire	Utilizado para separar los materiales ligeros (orgánicos) de los pesados (inorgánicos) en los desperdicios sólidos	Clasificadores de aire en zig-zag, vibratorio, rotatorio o tipo cuchillo, utilizados con los desperdicios procesados
Separación con cribas vibratorias	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados contenidos en los desperdicios sólidos, mediante separación por densidad	
Separación neumática (despepitadora)	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Separación por flotación y hundimiento	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Separación por inercia	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Separación con mesa inclinada	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Separación con mesas vibratorias	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Flotación	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	
Selección óptica	Utilizado para separar los materiales ligeros y pesados en los desperdicios sólidos	

TABLA 26-41 Operaciones y procesos de tratamiento para los desperdicios peligrosos[a]

Operación o proceso	Funciones realizadas[b]	Tipos de desperdicios[c]	Formas del desperdicio[d]
Tratamiento físico			
Adsorción[e]	Se	1, 2, 3, 4,	L
Aireación	Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Extracción con amoniaco	VR, Se	1, 2, 3, 4	L
Sorción con carbón	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L, G
Centrifugación	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Diálisis	VR, Se	1, 2, 3, 4	L
Destilación[e]	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Electrodiálisis	VR, Se	1, 2, 3, 4, 6	L
Encapsulación	St	1, 2, 3, 4, 6	L, S
Evaporación	VR, Se	1, 2, 5	L
Filtración[e]	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L, G
Floculación o asentamiento	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Flotación[e]	Se	1, 2, 3, 4	L
Ósmosis inversa	VR, Se	1, 2, 4, 6	L
Cribado	Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Sedimentación[e]	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Evaporación solar[e]	VR, Se	1, 2, 5	L
Extracción con disolvente	Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Espesamiento	Se	1, 2, 3, 4	L
Ultrafiltración	Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Depuración con vapor	VR, Se	1, 2, 3, 4	L
Tratamiento químico			
Calcinación	VR	1, 2, 5	L
Decloración química	De	1, 3	L
Intercambio iónico	VR, Se, De	1, 2, 3, 4, 5	L
Neutralización[e]	De	1, 2, 3, 4	L
Oxidación	De	1, 2, 3, 4	L
Precipitación[e]	VR, Se	1, 2, 3, 4, 5	L
Reducción	De	1, 2	L
Sorción	De	1, 2, 3, 4	L
Estabilización o solidificación[e]	De	1, 2, 3, 4	L
Tratamiento térmico			
Incineración[e]	VR, De	3, 5, 6, 7, 8	S, L, G
Pirólisis	VR, De	3, 4, 6	S, L, G
Tratamiento biológico			
Sedimento activado[e]	De	3	L
Lagunas aireadas	De	3	L
Digestión anaerobia	De	3	L
Filtros anaerobios	De	3	L
Filtros de espesamiento	De	3	L
Piletas de estabilización del desperdicio[e]	De	3	L

[a] Adaptado de *Report to Congress: Disposal of Hazardous Wastes*, V. S. EPA Publ. SW-115, 1974.
[b] Funciones: VR, reducción de volumen; Se, separación; De, destoxificación; St, almacenamiento.
[c] Tipos de desperdicios: 1. Producto químico inorgánico sin metales pesados; 2. Producto químico inorgánico con metales pesados; 3. Producto químico orgánico sin metales pesados; 4. Producto químico orgánico con metales pesados; 5. Radiológico; 6. Biológico; 7, Inflamable; 8. Explosivo.
[d] Formas del desperdicio: S, sólido; L, Líquido; G, gas.
[e] Las tecnologías más empleadas para el manejo de desperdicios peligrosos.

tratamiento es reducido. En la práctica, las operaciones de tratamiento físico, químico y térmico son las que se utilizan más comúnmente.

Identificación de los componentes del desperdicio En cualquier esquema de procesamiento (y colocación final) el punto clave es el conocimiento de las características de los desperdicios a manejar; sin esta información, un tratamiento o procesamiento eficiente es imposible. Por este motivo, las características de los desperdicios deben ser conocidas antes de aceptarlos y acarrearlos al sitio de tratamiento o de colocación final. En la mayor parte de los casos, la identificación adecuada de los componentes del desperdicio es responsabilidad del generador de dicho desperdicio.

Sistemas de recuperación de materiales El papel, hule, plásticos, textiles, vidrio, metales ferrosos y sustancias orgánicas e inorgá-

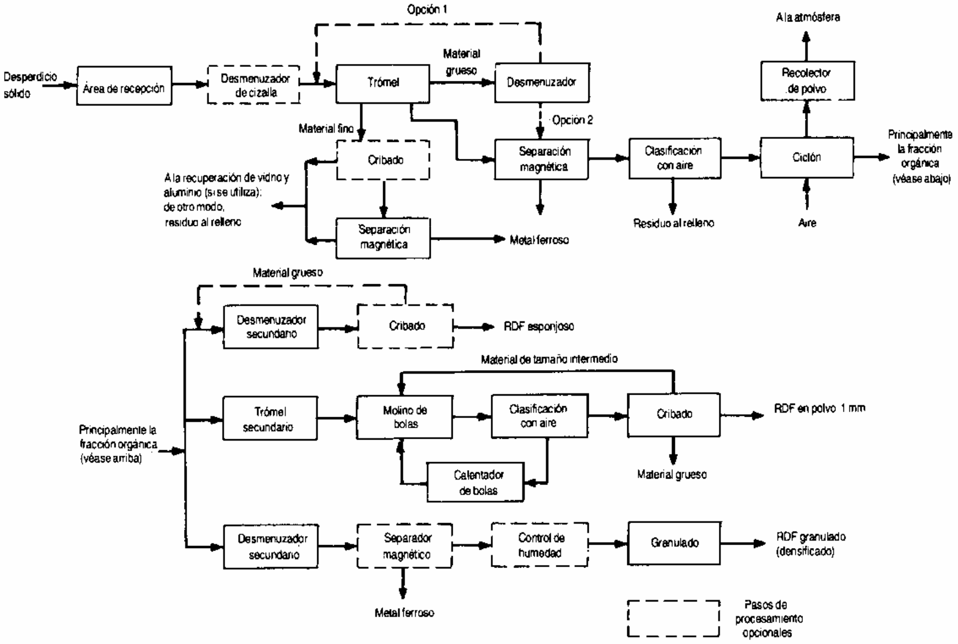


FIG. 26-48 Diagrama de flujo característico para la recuperación de materiales y la producción de combustibles derivados de los desperdicios (RDF). [Adaptado en parte de D. C. Wilson (ed.), *Waste Management: Planning, Evaluation, Technologies*, Oxford University Press, Oxford, 1981.]

TABLA 26-42 Procesos biológicos y químicos utilizados para la recuperación de los productos de conversión de los desperdicios sólidos

Proceso	Producto de conversión	Pretratamiento requerido	Comentarios
Biológico			
Abono	Material tipo humus	Desmenuzamiento y separación con aire	Principal desventaja: la falta de mercado; su aplicación a gran escala está técnicamente comprobada
Digestión anaerobia	Gas metano	Desmenuzamiento y separación con aire	Tecnología a escala de laboratorio, exclusivamente
Conversión biológica a proteína	Proteína y alcohol	Desmenuzamiento y separación con aire	Tecnología a escala de laboratorio, exclusivamente
Fermentación biológica	Glucosa y furfural	Desmenuzamiento y separación con aire	Utilizado junto con el proceso hidrolítico
Químico			
Incineración con recuperación de calor	Energía en forma de vapor	Ninguno	Se requieren mercados para el vapor; tecnología comprobada en varias aplicaciones a gran escala; los reglamentos sobre la calidad del aire pueden prohibir su empleo
Combustión complementaria del combustible en las calderas	Energía en forma de vapor	Desmenuzamiento, separación con aire y separación magnética	Si es deseable una menor inversión de capital, se requiere modificar las calderas existentes; los reglamentos sobre la calidad del aire pueden prohibir su uso
Gasificación	Energía en forma de gas, con bajo contenido de energía	Desmenuzamiento, separación con aire y separación magnética	La gasificación también se puede utilizar para la coeliminación de los sedimentos industriales
Pirólisis	Energía en forma de gas o aceite	Desmenuzamiento y separación magnética	Tecnología comprobada exclusivamente en aplicaciones de planta piloto; a pesar de que reduce al mínimo la contaminación, los reglamentos sobre la calidad del aire pueden prohibir su empleo
Hidrólisis	Glucosa y furfural	Desmenuzamiento y separación con aire	Tecnología comprobada únicamente a escala piloto
Conversión química	Aceite, gas, acetato de celulosa	Desmenuzamiento y separación con aire	Tecnología comprobada únicamente a escala piloto

TABLA 26-43 C
para los proces

	Partida
Tamaño de partícula	
Sembrado y mezclado	
Mezclado y volteado	
Requerimientos de air	
Requerimientos de ox	
Contenido de humeda	
Temperatura	
Razón carbono a nitr	
pH	
Control de patógeno	

*Adaptado de G.
ring Principles and M

nicas son los prin
desperdicios sóli

Una vez que se
la energía deben
obtención de los
predeterminadas
diagrama de fluj
específicos y la
como una fuente
se identifican a m
(RDF).

TABLA 26-43 Consideraciones importantes de diseño para los procesos de abono aerobio*

Partida	Comentario
Tamaño de partícula	Para obtener resultados óptimos, el tamaño de los desperdicios sólidos debe ser entre 25 y 75 mm (1 y 3 in)
Sembrado y mezclado	El tiempo de obtención del abono se puede reducir al sembrar con desperdicios sólidos parcialmente descompuestos hasta aproximadamente 1 a 5% en peso. También se puede agregar sedimento del drenaje a los desperdicios sólidos preparados. Cuando se agrega sedimento, el contenido final de humedad es la variable de control.
Mezclado y volteado	Para prevenir el secado, entortado y acanalamiento de aire, el material en el proceso de obtención del abono debe mezclarse o voltearse mediante un programa regular o según se requiera. La frecuencia del mezclado o volteado dependerá del tipo de operación para la obtención del abono.
Requerimientos de aire	Aire con al menos 50% de la concentración inicial de oxígeno debe llegar a todas partes del material para obtención de abono, con objeto de obtener resultados óptimos, especialmente en los sistemas mecánicos.
Requerimientos de oxígeno total	Se puede estimar la cantidad teórica de oxígeno requerida.
Contenido de humedad	Durante el proceso de obtención de abono, el contenido de humedad debe variar entre 50 y 60%. El valor óptimo es aproximadamente 55%.
Temperatura	Para obtener mejores resultados, la temperatura debe mantenerse entre 322 y 327 K (120 y 130°F) para los primeros días y entre 327 y 333 K (130 y 140°F) por el resto del periodo activo de obtención de abono. Si la temperatura es superior a 339 K (150°F) la actividad biológica se reduce en forma significativa.
Razón carbono a nitrógeno	Las razones iniciales de carbono a nitrógeno entre 35 y 50 (en peso) son las óptimas para la obtención de abono aerobio. A razones inferiores el amoniaco se disipa y la actividad biológica se ve impedida. A razones superiores, el nitrógeno puede ser el nutriente limitante.
pH	Para reducir al mínimo la pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco gaseoso, el pH no debe ser mayor a aproximadamente 8.5.
Control de patógenos	Si el proceso se lleva a cabo adecuadamente, pueden matarse todos los organismos patógenos, hierbas y semillas durante el proceso de obtención de abono. Para ello, la temperatura debe mantenerse entre 333 y 344 K (140 y 160°F) durante 24 h.

*Adaptado de G. Tchobanoglous, H. Teisen, R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

nicas son los principales materiales recuperables contenidos en los desperdicios sólidos industriales.

Una vez que se ha tomado la decisión de recuperar los materiales y/o la energía deben desarrollarse diagramas de flujo del proceso para la obtención de los componentes deseados, sujetos a las especificaciones predeterminadas de los materiales. En la figura 26-48 se presenta un diagrama de flujo característico para la recuperación de componentes específicos y la preparación de materiales combustibles para usarse como una fuente de combustible. Los materiales combustibles ligeros se identifican a menudo como combustibles derivados de desperdicios (RDF).

El diseño y disposición de las instalaciones físicas que constituyen el diagrama de flujo de la planta de procesamiento son aspectos importantes en la puesta en práctica y el éxito de la operación de dichos sistemas. Los factores importantes a considerar en el diseño y disposición de tales sistemas incluyen **1)** la eficiencia del comportamiento del proceso, **2)** la confiabilidad y flexibilidad, **3)** la facilidad y el bajo costo de la operación, **4)** los aspectos estéticos, y **5)** los controles ambientales.

Recuperación de los productos de conversión biológica Los productos que pueden ser recuperados por conversión biológica y que se pueden obtener de los desperdicios sólidos incluyen abono, metano, diferentes proteínas y alcoholes, y una variedad de otros compuestos orgánicos intermedios. El proceso principal utilizado se resume en la tabla 26-42. La fabricación de abono y la digestión anaerobia son los dos procesos más desarrollados y se consideran a continuación. La recuperación de gas de los rellenos de tierra se analiza en la parte de esta sección que trata sobre la colocación final.

Fabricación de abono Si los materiales orgánicos, excluyendo plásticos, hules y piel, se separan de los desperdicios sólidos municipales y se someten a una descomposición por medio de bacterias, el producto final que queda después de la actividad asimiladora y desasimiladora de las bacterias se conoce con el nombre de "abono" o "humus". El proceso que incluye tanto la separación como la conversión por medio de bacterias de los desperdicios sólidos orgánicos, se conoce como "fabricación de abono". La descomposición de los desperdicios sólidos orgánicos se puede realizar por medios aerobios o anaerobios, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno.

La mayor parte de las operaciones para la fabricación de abono incluye tres capas básicas: **1)** la preparación de los desperdicios sólidos, **2)** la descomposición de los desperdicios sólidos, y **3)** la preparación y comercialización del producto. La recepción, clasificación, separación, reducción de tamaño y adición de humedad y nutrientes son parte de la etapa de preparación. Se han desarrollado varias técnicas para realizar la etapa de descomposición. Una vez que los desperdicios sólidos se han convertido en humus, están listos para la tercera etapa, que

TABLA 26-44 Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia*

Partida	Comentario
Tamaño del material desmenuzado	Los desperdicios que van a digerirse deben desmenuzarse hasta un tamaño que no interfiera con el funcionamiento eficiente de las operaciones de bombeado y mezclado
Equipo de mezclado	Para lograr resultados óptimos y evitar la formación de espuma, se recomienda el mezclado mecánico.
Porcentaje de desperdicios sólidos mezclados con el sedimento	Aunque se han utilizado cantidades de desperdicio que varían de 50 a 90% o más, 60% parece ser un punto intermedio razonable.
Tiempo de residencia hidráulico y medio de la celda, $\theta_h = \theta_c$	El tiempo de lavado varía entre 3 y 4 días. Utilícense de 8 a 15 días para el diseño, con base en los resultados de los estudios de planta piloto.
Velocidad de carga	0.6 a 1.6 kg/(m^3·día) [0.04 a 0.10 lb/(ft^3·día)]. La velocidad no está bien definida en la actualidad. Se han informado velocidades significativamente superiores.
Temperatura	Entre 327 a 333 K (130 y 140°F).
Destrucción de los desperdicios sólidos volátiles	Varia entre 60 hasta 80%. Se puede utilizar 70% para propósitos de estimación.
Sólidos totales destruidos	Varía de 40 a 60%, dependiendo de la cantidad de material inerte presente al principio.
Producción de gas	0.5 a 0.75 m^3/kg (8 a 12 ft^3/lb) de sólidos volátiles destruidos (CH_4 = 60%, CO_2 = 40%).

*Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen, R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, Mc raw-Hill, New York, 1977.

†Las velocidades reales de eliminación de los sólidos volátiles pueden ser inferiores, y dependen de la cantidad de material extraído en la capa de espuma.

es la preparación y comercialización del producto. Esta etapa puede incluir una molienda fina, mezclado con varios aditivos, granulación/embalaje, almacenamiento, embarque y en algunos casos comercialización directa. En la tabla 26-43 se presentan las principales consideraciones de diseño realizadas con la descomposición biológica de desperdicios sólidos preparados.

Digestión anaerobia La digestión anaerobia o fermentación anaerobia, como se suele llamar, es el proceso utilizado para la producción de metano a partir de desperdicios sólidos. La mayor parte de los procesos en los que el metano se procesa a partir de desperdicios sólidos por digestión anaerobia incluyen tres etapas básicas. La primera etapa incluye la preparación de la fracción orgánica de los desperdicios sólidos para su digestión anaerobia y, por lo general, incluye la recepción, clasificación, separación y reducción de tamaño. La siguiente etapa incluye la adición de humedad y nutrientes, la mezcla, el ajuste del pH a aproximadamente 6.7, el calentamiento del precipitado hasta 327 y 333 K (130 y 140°F) y la digestión anaerobia en un reactor de flujo continuo, en el cual se mezcla el contenido durante un periodo que varía de 8 a 15 días. La tercera etapa incluye la captura, almacenamiento y, si es necesario, la separación de los componentes gaseosos generados durante el proceso de digestión. La colocación final del precipitado digerido es una tarea adicional a realizar. En la tabla 26-44 se resumen algunas consideraciones importantes de diseño. Dada la variabilidad de resultados reportados en la literatura, se recomienda realizar estudios de planta piloto si se va a utilizar el proceso de digestión para la conversión de los desperdicios sólidos.

Recuperación de los productos de conversión química Los productos de conversión química que pueden ser recuperados a partir de los desperdicios sólidos incluyen el calor, los gases, diversos aceites y varios compuestos orgánicos relacionados. Los principales procesos de conversión química que se han utilizado para la recuperación de productos utilizables a partir de los desperdicios sólidos se resumen en la tabla 26-42.

Incineración con recuperación de calor El contenido de calor de los gases producidos en la incineración de los desperdicios sólidos se puede recuperar al convertirlo en vapor. El bajo nivel de calor que permanece en los gases después de la recuperación del calor también se puede utilizar para precalentar el aire de combustión, al igual que el agua de repuesto de la caldera o el combustible de los desperdicios sólidos.

1. *En los incineradores existentes* En ellos se pueden instalar calderas para recuperar el calor de los desperdicios, que extraen el calor de los gases de combustión sin introducir cantidades excesivas de aire o humedad. En forma característica, los gases del incinerador se enfriarán desde 1250 a 1375 K (1800 a 2000°F) hasta 500 a 800 K (600 a 1000°F) antes de ser descargados a la atmósfera. Además de la producción de vapor, el empleo de un sistema de calderas es benéfico para reducir el número de gases a procesar en el equipo de control de contaminación del aire.

2. *En incineradores de pared de agua* En estos incineradores, las paredes internas de la cámara de combustión están recubiertas con los tubos de la caldera, que se colocan verticalmente y se sueldan en secciones continuas. Cuando se utilizan paredes de agua en lugar de materiales refractarios, no sólo son muy útiles para la recuperación de vapor, sino extremadamente eficaces para el control de la temperatura del horno sin introducir exceso de aire; sin embargo, están sujetos a corrosión por el ácido clorhídrico producido por la combustión de algunos compuestos plásticos.

Empleo de combustibles derivados de los desperdicios Los combustibles derivados de los desperdicios sólidos (RDF) también se pueden quemar directamente en las calderas industriales, que en la actualidad se utilizan para la producción de potencia con carbón pulverizado o petróleo. Además, estos combustibles se pueden quemar junto con el carbón o petróleo. A pesar de que el proceso con carbón no está bien establecido, en apariencia, de 15 a 20% de la entrada de calor puede ser de los desperdicios sólidos preparados. Con el uso de petróleo como combustible, aproximadamente 10% de la entrada de calor proviene de los desperdicios sólidos. Dependiendo del grado de procesamiento, se han utilizado sistemas de encendido por suspensión, de distribución con émbolo y doble vórtice.

Gasificación El proceso de gasificación incluye la combustión parcial de un combustible a base de carbón, para generar un gas combustible rico en monóxido de carbono e hidrógeno. Un gasificador consta básicamente de un incinerador que opera en condiciones de reducción. El calor para mantener el proceso se obtiene de las reacciones exotérmicas, en tanto que los componentes combustibles del gas bajo en energía están básicamente generados por reacciones endotérmicas. La cinética de la reacción del proceso de gasificación es bastante compleja y es aún tema sujeto a discusión.

Cuando el gasificador se opera a presión atmosférica, con aire como oxidante, los productos del proceso de gasificación son gases con bajo contenido de energía, que en forma característica contienen (en volumen) 10% de CO_2, 20% de CO, 15% de H_2 y 2% CH_4, con el complemento hasta 100% constituido por N_2 y un carbón de leña rico en carbono. Debido al efecto diluyente del nitrógeno en el aire de entrada, el gas de bajo contenido de energía tiene un contenido de energía que varía entre 5.2 y 6.0 MJ/m^3 (140 a 160 Btu/ft^3). Cuando se utiliza oxígeno puro como oxidante, se produce un gas con un contenido intermedio de energía, que varía entre 12.9 a 13.8 MJ/m^3 (345 a 370 Btu/ft^3)

Pirólisis De las muchas opciones de los procesos de conversión química que se han investigado, salvo la incineración, la pirólisis es la que ha recibido mayor atención. Según el tipo de reactor utilizado, la forma física de los desperdicios sólidos a pirolizar puede variar desde los desperdicios no desmenuzados hasta la porción finamente dividida de los desperdicios que permanecen después de las dos etapas de desmenuzamiento y clasificación por aire. Mediante el calentamiento en una atmósfera libre de oxígeno, la mayor parte de las sustancias orgánicas se pueden dividir con una combinación de fraccionamiento térmico y reacciones de condensación en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. La pirólisis es el término utilizado para describir el proceso. En contraste con el proceso de combustión, que es altamente exotérmico, el proceso pirolítico es altamente endotérmico. Por este motivo, se emplea a menudo el término "destilación destructiva" como una opción del término pirólisis.

Las características de las tres fracciones de componentes más importantes que resultan de la pirólisis son: **1)** una corriente de gas que contiene básicamente hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y varios otros gases, que dependen de las características orgánicas del material a pirolizar; **2)** una fracción que consiste en una corriente de alquitrán y/o aceite que es líquida a temperatura ambiente y se ha descubierto que contiene productos químicos, como ácido acético, acetona y metanol; y **3)** un carbón que consta casi exclusivamente de carbono más los materiales inertes que pudieron haber entrado al proceso. Se ha descubierto que la distribución de las fracciones de productos varían con la temperatura a la cual la pirólisis se realiza. En condiciones de máxima gasificación, el contenido de energía del gas resultante es aproximadamente 26.1 MJ/kg (700 Btu/ft^3). El contenido de energía de los aceites pirolíticos se ha estimado en 23.2 MJ/kg (10 000 Btu/lb).

Recuperación de energía de los productos de conversión Una vez que se han obtenido los productos de conversión a partir de los desperdicios sólidos por medio de uno o más de los métodos biológicos o químicos que aparecen en la tabla 26-42, el siguiente paso es su almacenamiento y/o uso. Si se va a producir energía, se requiere un paso adicional de conversión.

Sistemas de recuperación de energía Los principales componentes incluidos en la recuperación de energía a partir del calor, vapor, diferentes gases y aceites y otros productos de conversión son las calderas para la producción de vapor, las turbinas de vapor y de gas para la potencia motriz y los generadores de electricidad, para la conversión de potencia motriz en electricidad.

En la figura 26-49 aparecen los diagramas de flujo característicos para los sistemas opcionales de recuperación de energía. Quizá el diagrama de flujo más común para la producción de energía eléctrica incluya el empleo de un turbogenerador de vapor (véase la Fig. 26-49*a*).

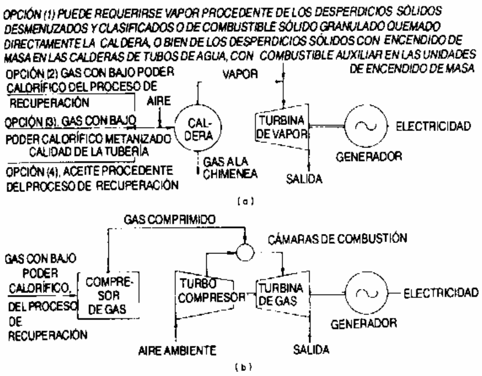


FIG. 26-49 Sistemas opcionales de generación de energía. *a*) Opciones con combinación de turbogenerador de vapor. *b*) Opciones con una combinación de compresor de gas y turbogenerador de gas. (Fuente: Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.)

Como se puede observar, cuando se utilizan desperdicios sólidos como fuente básica de combustible, se puede operar en cuatro modalidades. En la figura 26-49*b* aparece un diagrama de flujo que utiliza un turbogenerador de gas. El gas de bajo contenido de energía se comprime a alta presión, de tal manera que se puede emplear en forma más eficaz en la turbina de gas.

Factores de eficiencia Los datos representativos de eficiencia para las calderas, los reactores pirolíticos, las turbinas de gas, los turbogeneradores de vapor, los generadores eléctricos y los factores de uso y pérdida de las plantas relacionadas, aparecen en la tabla 26-45. En toda instalación que produce energía, deben considerarse las necesidades de energía de la estación o el proceso y las pérdidas de calor que no se consideraron; estas necesidades de energía auxiliar varían de 4 a 8% de la potencia producida. Las pérdidas de calor del proceso varían generalmente entre 2 y 8%.

Determinaciones de la eficiencia y salida de energía para los sistemas de recuperación de energía Un análisis de la cantidad de energía producida a partir de los sistemas de conversión de energía con base en los desperdicios sólidos, que utilizan una combinación de incineración, caldera, turbina de vapor y generador eléctrico, con una capacidad de 1000 toneladas métricas por día, se presenta en la tabla 26-46. Si se supone que el 10% de la potencia generada se utiliza para el sistema de procesamiento del frente terminal (los valores característicos varían de 8 a 14%), entonces la potencia total para exportar es 24 604 kW y la eficiencia total 17.5%.

COLOCACIÓN FINAL

La colocación final sobre los mantos de tierra o dentro de ella es actualmente el único método viable para el manejo a largo plazo de 1) los desperdicios sólidos recolectados y sin uso posterior, 2) la materia re-

TABLA 26-45 Eficiencia térmica característica, factores de empleo y pérdida de planta para los componentes individuales y procesos utilizados para la recuperación de energía a partir de los desperdicios sólidos

Componente	Eficiencia*: Intervalo	Eficiencia*: Valor característico	Comentarios
Incinerador-caldera	40–68	63	Encendido de masa
Caldera			
Combustible sólido	60–75	72	Desperdicios sólidos procesados (RDF)
Gas con bajo poder calorífico	60–80	75	Necesario modificar los quemadores
Operada con aceite	65–85	80	Los productos aceitosos producidos por los desperdicios sólidos es posible que necesiten mezclarse para reducir la corrosividad
Gasificador	60–70	70	
Reactor pirolítico			
Convencional	65–75	70	
Purox	70–80	75	
Turbinas			
De gas de combustión			
Con ciclo sencillo	8–12	10	
De regeneración	20–26	24	Incluyendo los accesorios necesarios
De gas de expansión	30–50	40	
Sistema de turbogenerador de vapor			
Inferior a 12.5 MW	24–40	29†‡	Incluye el condensador, los calentadores y todos los accesorios necesarios, pero no la caldera
De más de 10 MW	28–32	31.6†‡	
Generador eléctrico			
Inferior a 10 MW	88–92	90	
De más de 10 MW	94–98	96	
			Factores de empleo y pérdida de la planta
Concesión de la estación de servicio			
Planta de turbogenerador de vapor	4–8	6	
Proceso Purox	18–24	21	
Pérdidas de calor no consideradas	2–8	5	

*Valor teórico para el equivalente mecánico del calor = 3600 kJ/kWh.
†La eficiencia varía con la presión de salida. El valor característico dado se basa en una presión de salida que varía entre 50 y 100 mmHg.
‡Relación de calor = 11 395 kJ/kWh = (3600 kJ/kWh)/0.316.

TABLA 26-46 Salida de energía y eficiencia para una planta de recuperación de energía con turbogenerador y caldera de vapor, de 1000 ton métricas/día, que utiliza desperdicios sólidos industriales no procesados con un contenido de energía de 12 000 kJ/kg

Partida	Valor
Energía disponible en los desperdicios sólidos, millón kJ/h [(1000 ton métricas/día × 1000 kg/ton métrica × 12 000 kJ/kg)/(24 h/día × 10^6 kJ/millón kJ)]	500
Energía disponible en el vapor, millón kJ/h (500 millón kJ/h × 0.7)	350
Generación de potencia eléctrica, kW (350 millón kJ/h)/(11395 kJ/kWh)*	30 715
Concesiones para la estación de servicio, kW [30 715 (0.06)]	–1 843
Pérdidas de calor no consideradas, kW [30 715 (0.05)]	–1 536
Potencia eléctrica neta para exportar, kW	27 336
Eficiencia total, en porcentaje {(27 336 kW)/[(500 000 000 kJ/h)/(3600 kJ/kWh)]}(100)	19.7

*11 395 kJ/kWh = (3600 kJ/kWh)/0.316.

sidual que queda después de procesar los desperdicios sólidos, y **3)** la materia residual que queda después de la recuperación de los productos de conversión y/o la energía. Los tres métodos de colocación final en el terreno más utilizados son: **1)** el relleno del terreno; **2)** el aprovechamiento de los productos para el cultivo del terreno, y **3)** la inyección de pozo profundo. A pesar de que la incineración a menudo se considera como un método de colocación final, es en realidad un método de procesamiento. Recientemente, el concepto de utilizar los lodos en el fondo del océano como lugar para almacenar los desperdicios se ha considerado también.

Relleno del terreno con desperdicios sólidos El relleno del terreno incluye la colocación final controlada de los desperdicios sólidos sobre el manto terrestre o en su capa superior. Los aspectos importantes de rellenos sanitarios incluyen: **1)** la selección del sitio, **2)** los métodos y operaciones para el relleno del terreno, **3)** la presencia de gases y lixiviados en los rellenos del terreno, **4)** movimiento y control de los gases y lixiviados en los rellenos del terreno, y **5)** el diseño del relleno del terreno. El relleno del terreno con desperdicios peligrosos se considera en forma separada.

Selección del sitio Los factores a considerar en la evaluación de los sitios potenciales para la colocación final de los desperdicios sólidos se resumen en la tabla 26-47. La selección final del sitio para la colocación final se basa por lo general en los resultados de un estudio preliminar del sitio, en los resultados de los estudios de costos y diseños de ingeniería y en una determinación del impacto al medio ambiente.

Métodos y operaciones para el relleno del terreno Para utilizar en forma eficaz el área disponible del terreno debe elaborarse un plan de operaciones para la colocación de los desperdicios sólidos. Se han desarrollado varios métodos de operación, básicamente de acuerdo con la experiencia de campo. Los principales métodos utilizados para las áreas secas del relleno del terreno se pueden clasificar como **1)** área, **2)** surcos, y **3)** depresiones.

1. ***Método del área.*** El método del área se utiliza cuando el terreno no es adecuado para la excavación de surcos en los cuales se puedan colocar los desperdicios sólidos. Por lo general, la operación del relleno comienza por construir un dique de tierra contra el que se colocan los desperdicios en capas delgadas y compactadas (véase la Fig. 26-50). Cada capa se compacta a medida que progresa el relleno, hasta que el espesor de los desperdicios compactados llega a una altura que varía entre 2 y 3 metros (6 a 10 ft). En ese momento y al final de la operación diaria, una capa de 150 a 300 mm (6 a 12 in) de material de cubierta se coloca sobre el relleno terminado. El material de cubierta debe traerse en camiones o por medio de equipo para mover tierra de los terrenos adyacentes o de las áreas de foso de préstamo. En algunas operaciones, para los rellenos de terreno más recientes se omite el material diario de cubierta. Una elevación terminada que incluye el material de cubierta

TABLA 26-47 Factores importantes a considerar en la selección preliminar de los sitios de relleno

Factor	Consideraciones
Área de terreno disponible	Al seleccionar el terreno potencial para los sitios de colocación final es importante asegurarse de que se dispone de suficiente área de terreno. Se requiere una superficie suficiente para operar por lo menos 1 año en el sitio dado, con objeto de reducir al mínimo los costos.
Impacto sobre el procesamiento y la recuperación de recursos	Es importante proyectar la extensión de las actividades de procesamiento y recuperación de recursos que pueden ocurrir en el futuro y determinar su impacto sobre la cantidad y condición de materiales residuales que se desechan
Distancia de arrastre	A pesar de que son deseables distancias mínimas de arrastre, también deben considerarse otros factores, que incluyen: ubicación de las rutas de recolección, tipos de desperdicios a remolcar, modelos locales de tránsito y características de las rutas de y hasta el sitio de colocación final (condiciones de las rutas, modelos de tránsito y condiciones de acceso)
Condiciones de la tierra y topografía	Ya que se requiere proporcionar material para el relleno de cada día y una capa final de cubierta una vez que se ha terminado el relleno, deben obtenerse los datos necesarios sobre las cantidades y características de las tierras en el área. La topografía local afectará el tipo de operación del relleno a utilizar, los requerimientos de equipo y la extensión del trabajo que sea necesario hacer para usar el sitio.
Condiciones climatológicas	En la evaluación del sitio potencial deben considerarse también las condiciones locales del tiempo. En invierno, cuando el congelamiento es intenso, el material para cubrir el relleno debe estar disponible en pilas, si la excavación no es práctica. El viento y los patrones del viento también deben considerarse con cuidado. Para evitar los papeles llevados por el viento, deben instalarse barreras contra el viento.
Hidrología del agua superficial	La hidrología local del agua superficial del área del relleno es importante para establecer las características del drenaje y desagüe naturales existentes a considerar. También deben identificarse otras condiciones de inundación.
Condiciones geológicas e hidrológicas	Las condiciones geológicas e hidrogeológicas son quizá los factores más importantes para establecer lo adecuado, desde el punto de vista del medio ambiente, del área para el sitio de relleno. Se requieren datos sobre estos factores para determinar la contaminación potencial del sitio propuesto y establecer lo que se puede hacer en el sitio para el control del movimiento del lixiviado o los gases del relleno.
Condiciones locales del medio ambiente	La proximidad tanto de desarrollos residenciales como industriales es muy importante. Deben tomarse las precauciones necesarias en la operación del relleno para que sean adecuadas, desde el punto de vista del medio ambiente, con relación al control del ruido, olores, polvo, papeles llevados por el viento y vector.
Usos finales	Ya que el uso final afecta el diseño y la operación del relleno, esta partida debe solucionarse antes de planear y diseñar el relleno.

se conoce como una "celda" (véase la Fig. 26-51). Elevaciones sucesivas se colocan una sobre otra hasta que se llega a la inclinación final requerida en el plan de desarrollo. Se utiliza una última capa de material de cubierta cuando el relleno alcanza la altura final de diseño.

2. ***Método del surco.*** El método del surco (véase la Fig. 26-52) para el relleno del terreno es ideal en áreas donde se dispone de una profundidad adecuada de material de cubierta en el sitio y donde la capa freática está muy por debajo de la superficie. Al iniciar el proceso, se excava una porción de surco y la tierra se apila para formar un dique detrás del primer surco. Después se colocan los desperdicios en el surco diseminado en capas delgadas y compactadas. La operación continúa hasta alcanzar la altura deseada. El material de cubierta se obtiene

FIG. 26-50 Métod
a) Diagrama del relle

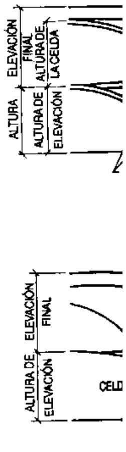


FIG. 26-51 Secci
diaria o intermedia.

por excavación d
se está rellenand
3. *Método de*
naturales o artific
para las operacio
utilizado los cañ
canteras. Las téc
dos en los rellen

nsiderar en la
no

ıraciones

› potencial para los sitios
mportante asegurarse de
nte área de terreno. Se re-
ficiente para operar por lo
ado, con objeto de reducir

la extensión de las activi-
y recuperación de recur-
el futuro y determinar su
d y condición de materia-
echan

ables distancias mínimas
en considerarse otros fac-
ación de las rutas de reco-
icios a remolcar, modelos
cterísticas de las rutas de
ción final (condiciones de
sito y condiciones de ac-

orcionar material para el
capa final de cubierta una
el relleno, deben obtener-
obre las cantidades y ca-
s en el área. La topografía
peración del relleno a uti-
de equipo y la extensión
ario hacer para usar el si-

potencial deben conside-
ones locales del tiempo.
ongelamiento es intenso,
relleno debe estar dispo-
vación no es práctica. El
el viento también deben
o. Para evitar los papeles
deben instalarse barreras

pa superficial del área del
ra establecer las caracte-
ógic naturales existentes
deben identificarse otras
ón.

cas e hidrogeológicas son
portantes para establecer
nto de vista del medio am-
tio de relleno. Se requie-
tores para determinar la
l del sitio propuesto y es-
hacer en el sitio para el
del lixiviado o los gases

desarrollos residenciales
ty importante. Deben to-
ecesarias en la operación
adecuadas, desde el pun-
ente, con relación al con-
lvo, papeles llevados por

el diseño y la operación
ebe solucionarse antes de
no.

Elevaciones sucesi-
la inclinación final
ltima capa de mate-
final de diseño.
véase la Fig. 26-52)
se dispone de una
el sitio y donde la
il iniciar el proceso,
ra formar un dique
perdicios en el sur-
La operación conti-
cubierta se obtiene

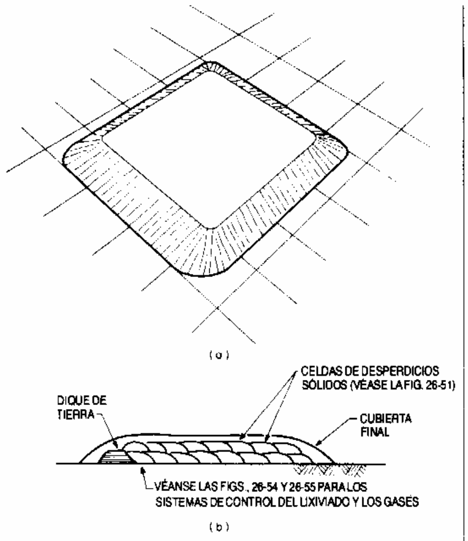


FIG. 26-50 Método del área para rellenar el terreno con desperdicios sólidos. *a*) Diagrama del relleno terminado. *b*) Sección transversal del relleno.

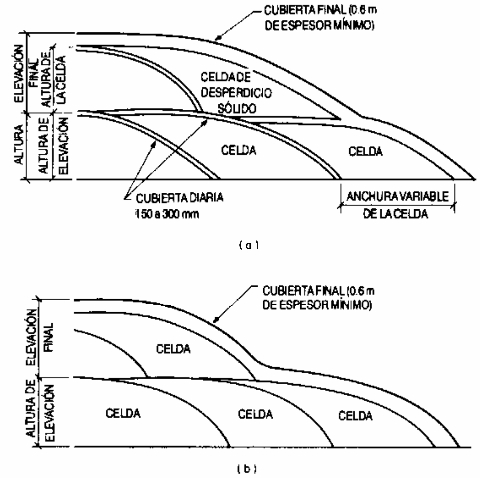


FIG. 26-51 Sección transversal característica de un relleno. *a*) Con cubierta diaria o intermedia. *b*) Sin cubierta diaria o intermedia.

por excavación de un surco adyacente o la continuación del surco que se está rellenando.

3. *Método de depresión.* En los sitios donde existen depresiones naturales o artificiales, a menudo es posible utilizarlos adecuadamente para las operaciones de relleno del terreno. Para este propósito se han utilizado los cañones, las barrancas, los fosos secos de préstamo y las canteras. Las técnicas para colocar y compactar los desperdicios sólidos en los rellenos del terreno por depresión varían con la geometría

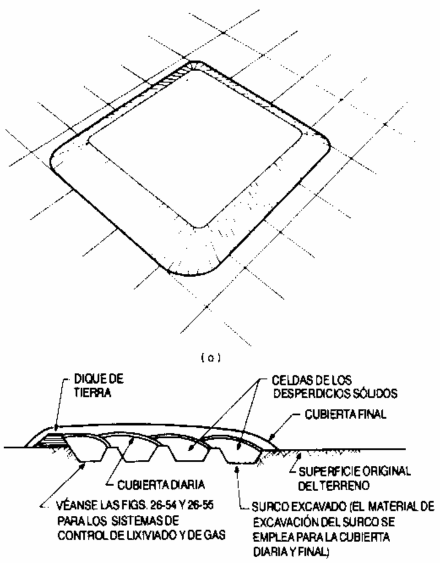


FIG. 26-52 Método del surco, para el relleno del terreno con desperdicios sólidos. *a*) Vista del relleno terminado. *b*) Sección transversal del relleno.

del sitio, las características del material de cubierta, la hidrología y geología del sitio, y el acceso al sitio.

En un cañón, el relleno se inicia por la cabeza terminal del cañón (véase la Fig. 26-53) y termina en la boca. Esta práctica previene la acumulación de agua detrás del relleno del terreno. Por lo general, los desperdicios se depositan en el fondo del cañón y después se empujan contra la cara del cañón con una pendiente aproximada de 2 a 1; de esta manera se puede lograr un alto grado de compactación.

4. *Rellenos en áreas húmedas.* Debido a los problemas relacionados con la contaminación de aguas subterráneas, el desarrollo de olores y la estabilidad estructural, los rellenos del terreno se emplean rara vez en áreas húmedas. Si deben utilizarse estas áreas como sitios de relleno del terreno, por ejemplo pantanos y marismas, áreas de mareas o estanques, fosos o canteras, deben tomarse las precauciones necesarias para contener o eliminar los movimientos de los lixiviados y gases de las celdas terminadas. Por lo general esto se realiza drenando primero el sitio y recubriendo después el fondo con arcilla u otro sellador apropiado. Si se utiliza arcilla, es importante continuar la operación de drenaje hasta que el sitio esté lleno, para evitar la generación de presiones hacia arriba que puedan hacer que el recubrimiento se rompa por elevación.

Presencia de gases y líquido lixiviado en los rellenos Los siguientes procesos biológicos, físicos y químicos ocurren cuando los desperdicios sólidos se colocan en rellenos sanitarios: **1)** descomposición biológica de los materiales orgánicos, ya sea aerobia o anaerobiamente, con la generación de gases y líquidos; **2)** oxidación química de los materiales de desperdicio; **3)** escape de gases del relleno; **4)** movimiento de líquidos causado por presiones hidráulicas diferenciales; **5)** disolución y lixiviación de materiales orgánicos e inorgánicos por el agua y movimiento del lixiviado a través del relleno; **6)** movimiento del material disuelto por gradientes de concentración y ósmosis, y **7)** un asentamiento no uniforme causado por la consolidación del material en los espacios vacíos.

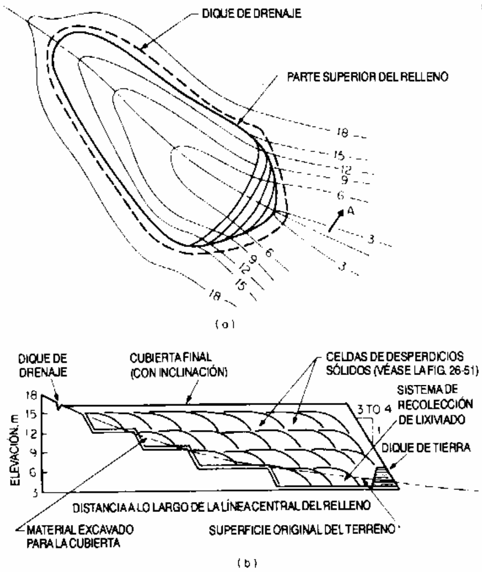


FIG. 26-53 Método de la depresión para el relleno del terreno con desperdicios sólidos. *a*) Vista de planta; relleno del terreno en un cañón. *b*) Sección transversal del relleno.

Por lo que respecta al punto 1, la descomposición bacteriana inicial ocurre en condiciones aerobias, porque cierta cantidad de aire está atrapado dentro del relleno. Sin embargo, el oxígeno en el aire atrapado se acaba en unos cuantos días, y una descomposición a largo plazo se presenta en condiciones anaerobias.

1. *Gases en los rellenos.* Los gases encontrados en los rellenos incluyen aire, amoniaco, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, metano, nitrógeno y oxígeno. En la tabla 3-30 de la sección 3 se presentan los datos sobre el peso molecular y la densidad de estos gases. El dióxido de carbono y el metano son los principales gases producidos por la descomposición anaerobia de los componentes orgánicos del desperdicio sólido.

La conversión anaerobia de los compuestos orgánicos se supone que ocurre en tres etapas; la primera incluye la transformación por medio de enzimas (hidrólisis) de los compuestos de alto peso molecular a compuestos adecuados para usarse como fuente de energía y carbón de la celda; la segunda está relacionada con la conversión, por medio de bacterias, de los compuestos que resultan de la primera etapa, en compuestos intermedios de menor peso molecular; y la tercera etapa incluye la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos terminales más simples como dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). La conversión anaerobia global de los desperdicios industriales orgánicos se puede representar por medio de la siguiente ecuación

$$C_aH_bO_cN_d \rightarrow nC_wH_xO_yN_z + mCH_4 + sCO_2 + rH_2O + (d - nz)NH_3 \qquad (26\text{-}13)$$

donde $s = a - nw - m$

$r = c - ny - 2s$

Los términos "$C_aH_bO_cN_d$" y "$C_wH_xO_yN_z$" se utilizan para representar, en una base molar, la composición del material presente al iniciarse el proceso. Si se supone que los desperdicios orgánicos se estabilizan completamente, la expresión correspondiente es

$$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right)CO_2 + dNH_3 \qquad (26\text{-}14)$$

La velocidad de descomposición en los rellenos no manejados, medida por la producción de gas, alcanza su máximo en los primeros dos años y disminuye después con lentitud, y continúa en muchos casos durante periodos hasta de 25 años o más. El volumen total de los gases liberados durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias maneras. Si todos los constituyentes orgánicos presentes en los desperdicios (con excepción de plásticos, hules y piel) se representan por una ecuación generalizada de la forma $C_aH_bO_cN_d$, el volumen total de gas se puede estimar utilizando la ecuación (26-14), suponiendo una conversión completa en dióxido de carbono y metano.

2. *Lixiviado en los rellenos.* El lixiviado se puede definir como el líquido que se ha filtrado a través del desperdicio sólido y extraído de él materiales disueltos o en suspensión. En la mayor parte de los rellenos, la parte líquida del lixiviado está compuesta por el líquido producido por la descomposición de los desperdicios y el líquido que entró al relleno procedente de fuentes externas, como el drenaje superficial, el agua de lluvia, el agua subterránea y el agua de manantiales subterráneos. Los datos representativos de las características químicas del lixiviado se resumen en la tabla 26-48.

Movimiento y control de gas y lixiviado En condiciones ideales, los gases generados en los rellenos deben ventearse a la atmósfera o, en rellenos más grandes, recolectarse para la producción de energía. El lixiviado debe contenerse dentro del relleno o extraerse para su tratamiento.

1. *Movimiento de los gases.* En la mayor parte de los casos, aproximadamente el 90% del volumen de gas producido por la descomposición de los desperdicios sólidos consta de metano y dióxido de carbono. A pesar de que la mayor parte del metano escapa a la atmósfera, tanto éste como el dióxido de carbono se han encontrado en concentraciones hasta del 40% en distancias laterales de hasta 120 m (400 ft) de las orillas de los rellenos. Si se ventea a la atmósfera de una manera no controlada, el metano se puede acumular (debido a que su gravedad específica es menor que la del aire) debajo de los edificios o en otros espacios cerrados cercanos al relleno sanitario. Sin embargo, con el venteo adecuado, el metano no presenta problemas.

TABLA 26-48 Datos sobre la composición del lixiviado en el relleno*

Componente	Valor†, mg/l: Intervalo‡	Valor†, mg/l: Característico
BOD_5 (5 días de demanda de oxígeno bioquímico)	2 000–30 000	10 000
TOC (carbono orgánico total)	1 500–20 000	6 000
COD (demanda de oxígeno químico)	3 000–45 000	18 000
Sólidos totales en suspensión	200–1 000	500
Nitrógeno orgánico	10–600	200
Nitrógeno de amoniaco	10–800	200
Nitratos	5–40	25
Fósforo total	1–70	30
Orto fósforo	1–50	20
Alcalinidad como $CaCO_3$	1 000–10 000	3 000
pH	5.3–8.5	6
Dureza total como $CaCO_3$	300–10 000	3 500
Calcio	200–3 000	1 000
Magnesio	50–1 500	250
Potasio	200–2 000	300
Sodio	200–2 000	500
Cloruro	100–3 000	500
Sulfato	100–1 500	300
Hierro total	50–600	60

*Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

†Excepto pH

‡Rango representativo de valores. El valor máximo se ha reportado en la literatura sobre el tema para algunos de los componentes.

$\frac{2c - 3d}{} \Big) CH_4$

$\frac{}{}NH_3$ (26-14)

no manejados, me-
en los primeros dos
a en muchos casos
en total de los gases
de estimarse de va-
os presentes en los
piel) se representan
O_cN_d, el volumen
(26-14), suponien-
y metano.
puede definir como
io sólido y extraído
mayor parte de los
esta por el líquido
ios y el líquido que
no el drenaje super-
gua de manantiales
cterísticas químicas

ondiciones ideales,
se a la atmósfera o,
cción de energía. El
rse para su trata-

te de los casos, apro-
lo por la descompo-
no y dióxido de car-
capa a la atmósfera,
ntrado en concentra-
ta 120 m (400 ft) de
ra de una manera no
a que su gravedad
edificios o en otros
Sin embargo, con el
s.

ón del lixiviado

Valor†, mg/l	
lo‡	Característico
000	10 000
000	6 000
000	18 000
000	500
0	200
0	200
)	25
)	30
)	20
000	3 000
5	6
000	3 500
000	1 000
500	250
000	300
000	500
000	500
500	300
0	60

lid Wastes: Engineering k, 1977.

reportado en la literatura

Ya que el dióxido de carbono es 1.5 más denso que el aire y 2.8 más denso que el metano, tiende a moverse hacia el fondo del relleno. Como resultado de ello, la concentración del dióxido de carbono en las porciones inferiores del relleno puede ser alta durante años. Por último, dada su densidad, el dióxido de carbono se moverá también hacia abajo a través de la formación subyacente, hasta llegar al agua subterránea. Como el dióxido de carbono es fácilmente soluble en agua, por lo general reduce el pH, que a su vez incrementa la dureza y el contenido mineral de las aguas subterráneas por la solubilización de los carbonatos de calcio y magnesio.

2. *Control del movimiento de gas.* El movimiento lateral de los gases producidos en los rellenos se puede controlar mediante la instalación de venteos hechos con materiales que sean más permeables que el terreno circundante. En forma característica, como se observa en la figura 26-54*a*, los venteos de gases se hacen con grava. El espaciamiento de los venteos de las celdas depende del ancho de las celdas de desperdicio, pero generalmente varían entre 18 a 60 m (60 a 200 ft). El espesor de la capa de grava debe ser tal que permanezca continua, incluso cuando existan asentamientos diferenciales; se recomiendan 300 a 450 mm (12 a 18 in). Los venteos tipo barrera o pozo (véase la Fig. 26-54*b*) se pueden emplear también para el control del movimiento lateral de los gases. Los venteos de pozos se utilizan a menudo junto con venteos laterales de superficie enterrados bajo el nivel del surco de grava (véase la Fig. 26-54*c*). El control del movimiento descendente de los gases se puede realizar mediante la instalación de tuberías perforadas en la capa de grava, en el fondo del relleno. Si los gases no pueden ventearse lateralmente, es necesaria la instalación de pozos de gases y ventear el gas bombeado a la atmósfera.

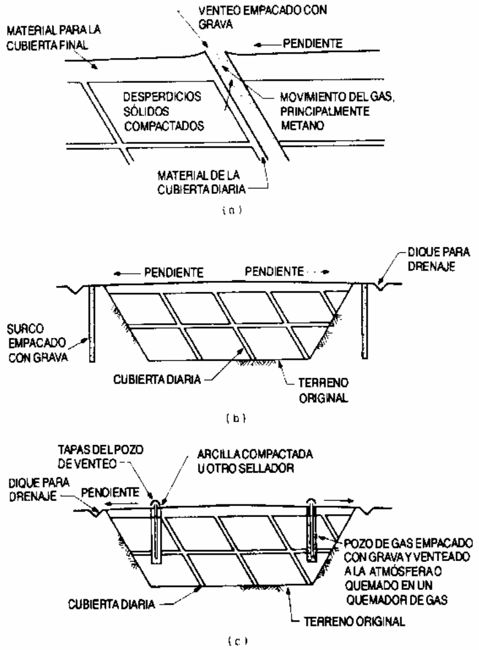


FIG. 26-54 Venteos utilizados para controlar el movimiento lateral de gases en los rellenos. *a*) Celda. *b*) Barrera. *c*) Pozo. (Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.)

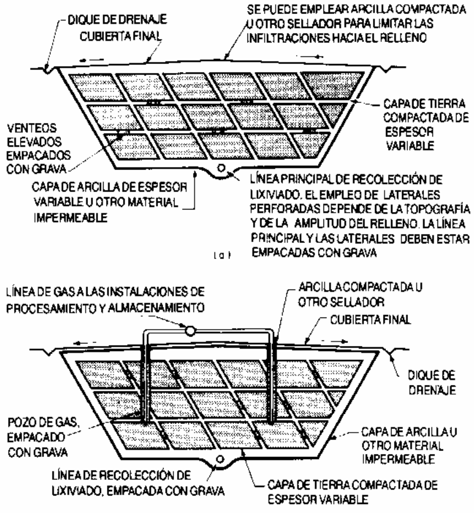


FIG. 26-55 Empleo de un recubrimiento impermeable para controlar el movimiento de gases y lixiviado en los rellenos. *a*) Sin recuperación de gas. *b*) Con recuperación de gas. (Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.)

El movimiento de los gases en los rellenos a través de las formaciones de tierra adyacentes, se puede controlar mediante la construcción de barreras de materiales que sean más impermeables que el terreno (véase la Fig. 26-55*a*). Algunos de los selladores para los rellenos que están disponibles para este objetivo se resumen en la tabla 26-49. De ellos, el empleo de arcillas compactadas es el más común. El espesor variará dependiendo del tipo de arcilla y el grado de control requerido; se han utilizado espesores que varían de 0.15 a 1.25 m (6 a 48 in).

3. *Control del movimiento del gas por recuperación.* El movimiento de los gases en los rellenos también se puede controlar mediante la instalación de pozos recuperadores de gas en los rellenos terminados (véase la fig. 26-55*b*). Cuando se va a recuperar el gas del relleno se utiliza arcilla y otros recubrimientos. En algunos sistemas de recuperación de gas, el líquido lixiviador se recolecta y recircula a la parte superior del relleno y se inyecta a través de líneas perforadas colocadas en tramos de drenaje. Característicamente, la velocidad de producción de gas es mayor en los sistemas con recirculación de líquido lixiviador.

A pesar de que se han instalado sistemas de recuperación de gas en algunos rellenos municipales grandes, el aspecto económico de dicha operación no se ha definido hasta ahora. El costo de los depuradores de gases y el equipo de procesamiento pueden limitar la recuperación de gases de los rellenos pequeños.

4. *Movimiento de líquido lixiviador.* En condiciones normales, el líquido lixiviador se encuentra en el fondo de los rellenos. De ahí se mueve a través de los diferentes estratos, a pesar de que pudiera ocurrir un movimiento lateral, dependiendo de las características del material circundante. La velocidad de filtración del lixiviador procedente del fondo del relleno se puede estimar por la ley de Darcy, al suponer que el material que está bajo el relleno y en la parte superior de la capa freática se encuentra saturado y que una pequeña capa de líquido lixiviador existe en el fondo del relleno. En estas condiciones, el líquido lixiviador se descarga a una velocidad por unidad de área que es igual al valor del coeficiente de permeabilidad K, expresado en metros por día. El valor calculado representa la cantidad máxima de filtración que puede esperarse y este valor debe utilizarse para propósitos de diseño.

TABLA 26-49 Selladores de los rellenos, para el control de movimiento del gas y lixiviado*

Sellador		
Clasificación	Tipos representativos	Consideraciones
Tierra compactada		Debe contener algo de arcilla o aluvión fino
Arcilla compactada	Bentonitas, ilitas, caolinitas	El más utilizado de los selladores para los rellenos; el espesor de la capa varía de 0.15 a 1.2 m (6 a 48 in); la capa debe ser continua y no debe permitirse que se seque o agriete.
Productos químicos inorgánicos	Carbonato, silicato o pirofosfato de sodio	Su empleo depende de las características locales de la tierra
Productos químicos sintéticos	Polímeros, hule de látex	En fase experimental; su empleo no está bien establecido
Recubrimientos de membrana sintética	Recubrimientos de cloruro de polivinilo, hule de butilo, Hypalon, polietileno, nylon reforzado	Costoso; se puede justificar si se recupera el gas
Asfalto	Asfalto modificado, asfalto cubierto con tela de polipropileno, asfalto, concreto	La capa debe ser bastante gruesa para mantener la continuidad en condiciones de asentamiento diferencial
Otros	Concreto de gunita, cemento de tierra, cemento plástico de tierra	

*Fuente: G. Tchobanoglous, H. Theisen y R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

En condiciones normales, la velocidad real será menor que el valor antes mencionado, porque la columna de tierra que está bajo el relleno no estará saturada.

5. *Control del movimiento del líquido lixiviador.* A medida que el lixiviador se filtra a través de los estratos subyacentes, gran parte de los constituyentes químicos y biológicos que originalmente contenía serán eliminados por la filtración y absorción del material que constituye el estrato. En general, la amplitud de esta acción depende de las características de la tierra, especialmente del contenido de arcilla. Dado el riesgo potencial que existe al permitir que el líquido lixiviador se filtre a las aguas subterráneas, la mejor práctica es su eliminación o contención. Por último, quizá sea necesario recolectar y tratar este líquido lixiviador.

El empleo de arcilla ha sido el método más favorecido para reducir o eliminar la filtración del líquido lixiviador (véanse la Fig. 26-55 y la tabla 26-49). Los recubrimientos de membrana también se han utilizado, pero son costosos y se requiere cuidado para que no se dañen durante la operación de relleno. De igual importancia en el control del movimiento del líquido lixiviador es la eliminación de la infiltración de agua superficial, que es el principal contribuyente del volumen total del lixiviador. Al utilizar una capa de arcilla impermeable se puede controlar en forma eficiente la infiltración superficial, mediante el logro de una pendiente superficial adecuada (1 a 2%) y un drenaje correcto. En la tabla 26-50 aparecen las características de los diferentes tipos de tierra utilizada para cubrir los rellenos.

6. *Asentamientos y características estructurales de los rellenos.* El asentamiento de los rellenos depende del grado de compactación inicial, las características de los desperdicios, el grado de descomposición y los efectos de consolidación, cuando se genera lixiviado y gases en el relleno. La altura del relleno terminado también ejerce influencia sobre la compactación inicial y el grado de consolidación. El grado de consolidación puede expresarse mediante una ecuación de primer orden.

Diseño y operación de los rellenos Consideraciones importantes en el diseño y la operación de los rellenos incluyen: **1)** los requerimientos del terreno, **2)** los tipos de desperdicios que deben ser manejados, **3)** la evaluación de la filtración potencial, **4)** el diseño de las instalaciones para el control del drenaje y la filtración, **5)** el desarrollo general del plan de operación, **6)** el diseño del plan para el relleno de desperdicios sólidos, y **7)** la determinación de los requerimientos de equipo. En la tabla 26-51 se proporcionan los factores individuales más importantes a considerar en el diseño del relleno. A continuación, los últimos tres puntos se analizarán con más detalle.

1. *Plan de operación del relleno.* El diseño del sitio y el desarrollo de un horario de operación son los dos principales aspectos del plan de operación del relleno. Al planear el diseño de un sitio de relleno, se debe determinar la ubicación de los siguientes aspectos: **1)** carreteras de acceso, **2)** cobertizos para el equipo, **3)** escalas, si se utilizan, **4)** sitios de almacenamiento para desperdicios especiales, **5)** sitios para apilar los materiales en la parte superior del terreno, **6)** áreas de relleno, y **7)** equipos e instalaciones.

2. *Plan para el relleno con desperdicios sólidos.* El método específico de relleno dependerá de las características del sitio como, por ejemplo, la cantidad disponible del material para cubrir, la topografía y la hidrología y geología locales. Para evaluar planes futuros de desarrollo, será necesario preparar un plan detallado para el diseño de las celdas individuales para los desperdicios sólidos. Con base en las características del sitio o en el método de operación (por ejemplo la re-

TABLA 26-50 Clasificaciones generalizadas de adaptabilidad de los diferentes tipos de terrenos, para utilizarse como material para la cubierta del relleno*

Función	Tipo general de terreno†					
	Grava limpia	Grava con arcilla y aluvión	Arena limpia	Arena con arcilla y aluvión	Aluvión	Arcilla
Evita que los roedores hagan cuevas o túneles	G	F–G	G	P	P	P
Evita que surjan las moscas	P	F	P	G	G	E‡
Reduce al mínimo la humedad en todo el relleno	P	F–G	P	G–E	G–E	E‡
Reduce al mínimo el venteo de gas del relleno a través de la cubierta	P	F–G	P	G–E	G–E	E‡
Proporciona apariencia agradable y controla los papeles llevados por el viento	E	E	E	E	E	E
Ayuda a la vegetación	P	G	P–F	E	G–E	F–G
Ventea el gas de descomposición (es permeable)§	E	P	G	P	P	P

*Fuente: D. R. Brummer y D. J. Keller, *Sanitary Landfill Design and Operation*, U. S. EPA Publ. SW-65ts, 1972

†E, excelente; G, bueno, F, regular, P, malo.

‡Excepto cuando las grietas se extienden a través de toda la cubierta.

§Sólo si está bien drenado.

TABLA 26-51 Factores importantes a considerar en el diseño y operación de los terrenos rellenos con desperdicios sólidos

Factor	Consideraciones
Diseño	
Acceso	Las carreteras de acceso al sitio deben estar pavimentadas; las carreteras a las áreas de descarga pueden ser de terracería
Diseño y construcción de la celda	Variará y depende del terreno, el método del relleno y de si se va a recuperar el gas
Material de la cubierta	Se lleva al máximo el empleo de los materiales de tierra del sitio; aproximadamente se requiere 1 m^3 de material de cubierta por cada 4 a 6 m^3 de desperdicios sólidos; para controlar la infiltración de la superficie, se mezcla con selladores. En algunos diseños no se utiliza la cubierta intermedia
Drenaje	Se instalan diques de drenaje para desviar el agua de la superficie; se mantiene una pendiente de 1 a 2% en el relleno terminado para evitar el estancamiento
Requerimientos de equipo	Varía con las dimensiones del relleno
Prevención de incendios	Suministro de agua al sitio; si no es potable, las salidas deben marcarse claramente; una separación adecuada de la celda evita que se queme todo el relleno si ocurre la combustión
Protección del agua subterránea	Desvíese cualquier manantial subterráneo; si se requieren, colóquense selladores para el control del lixiviado; instálense pozos para el gas y monitoréese el agua subterránea
Área del terreno	El área debe ser lo bastante grande para contener todos los desperdicios por un periodo mínimo de 1 año, pero de preferencia de 5 a 10 años
Método de relleno	La selección del método variará con el terreno y la cubierta disponible
Control de la basura	Empleénse bardas móviles en el área de descarga; las cuadrillas deben recoger la basura al menos una vez por mes o según se requiera
Plan de operación	Con o sin codisposición de los sedimentos de la planta de tratamiento y la recuperación de gas
Diseminación y compactación	Disemínense y compáctense los desperdicios en capas de 0.6 m (2 ft)
Área de descarga	Manténgala pequeña, generalmente inferior a 30 m (100 ft)
Operación	
Comunicaciones	Teléfono para emergencias
Días y horas de operación	La práctica usual es de 5 a 6 días/semana y 8 a 10 h/día
Instalaciones para los empleados	Deben proporcionarse baños y agua para beber
Mantenimiento del equipo	Debe proporcionarse un cobertizo para el mantenimiento del equipo
Registros de operación	Si se cobra una cuota por la colocación deben mantenerse registros de peso, transacciones y facturas
Recuperación	No se debe recoger basura; la recuperación debe ser lejos del área de descarga; no se deben almacenar los materiales recuperados en el sitio
Escalas	Esencial para el mantenimiento de registros

cuperación de gas) pueden incorporarse aspectos especiales para el control del movimiento de los gases y del líquido lixiviador del relleno.

3. *Requerimientos de equipo.* Los tipos de equipo que se utilizan en un relleno sanitario incluyen tractores de llantas de hule y tractores rastreros, desmenuzadoras, compactadores, palas de arrastre y motoconformadoras (véase la Fig. 26-56). Las dimensiones y la cantidad de equipo requerido dependerán básicamente de las condiciones locales del sitio, las operaciones a realizar en el relleno y el método de operación.

Relleno del terreno con desperdicios peligrosos En la mayoría de los estados, la única opción disponible para la colocación final de la mayor parte de los desperdicios peligrosos es un relleno. Las bases para el manejo de los rellenos con desperdicios peligrosos aparecen en la Resource Conservation and Recovery Act de 1976. En general, los sitios para la colocación final de los desperdicios peligrosos deben separarse de los sitios para los desperdicios sólidos municipales. Si no es posible la separación de los desperdicios, debe asegurarse que se mantengan operaciones separadas de colocación final del desperdicio.

Requerimientos Los requerimientos para un relleno de desperdicios peligrosos se detallan en RCRA y en el reglamento desarrollado para poner en práctica la ley. Desde un punto de vista de diseño, los dos requerimientos más importantes son: **1)** la contención del líquido lixiviador total, y **2)** el control de agua superficial en el sitio y sus alrededores.

Selección del sitio Los factores a considerar en la evaluación de los sitios probables para la colocación final de los desperdicios peligrosos están actualmente en un estado de cambio. En California, los rellenos para colocar desperdicios peligrosos se conocen como sitios de colocación final Clase 1. Para ser calificado como un sitio Clase 1, debe demostrarse que:

1. Las condiciones geológicas son capaces por naturaleza de prevenir la continuidad hidráulica vertical entre los líquidos y gases que emanen del desperdicio en el sitio y las aguas subterráneas o de superficie aprovechables.

2. Las condiciones geológicas son capaces por naturaleza de prevenir la continuidad hidráulica lateral entre los líquidos y gases que emanen del desperdicio en el sitio y las aguas subterráneas o superficies aprovechables, o bien el área para la colocación final se ha modificado para lograr esta capacidad.

3. Las formaciones geológicas subyacentes, que contienen rocas fracturadas o fisuradas de dudosa permeabilidad, deben sellarse permanentemente para proporcionar una barrera adecuada al movimiento de los líquidos o gases que emanan del sitio de colocación final hacia las aguas aprovechables.

4. La inundación del área de colocación final no ocurrirá hasta que el sitio quede cerrado de acuerdo con los requerimientos de la junta regional.

5. Las áreas de colocación final no estarán sujetas a filtraciones.

FIG. 26-56 Equipo utilizado para compactar y colocar los desperdicios en los rellenos. *a*) Tractor de arrastre convencional. *b*) Compactador con ruedas de metal articuladas.

6. El líquido lixiviador y el flujo subterráneo en las áreas de colocación final deben mantenerse dentro del sitio, a menos que se decida otra cosa, de acuerdo con los requerimientos de la junta regional.

7. Los sitios no deben estar ubicados sobre zonas de fallas activas o donde otras formaciones de cambios geológicos perjudiquen la acción de la naturaleza o las barreras artificiales que impiden la continuidad hidráulica hacia las aguas aprovechables.

8. Los sitios con barreras físicas fabricadas por el hombre no deben localizarse en donde las operaciones o el mantenimiento inadecuado de tales estructuras permitan que los desperdicios, el líquido lixiviado o los gases entren en contacto con las aguas subterráneas aprovechables o el agua superficial.

9. Los sitios que cumplen con las cláusulas antes anotadas, pero que están sujetos a inundaciones debido a las mareas o a las crecientes con frecuencia mayor de 100 años, pueden considerarse como sitios para la colocación final Clase 1 limitada por la junta regional.

Métodos y operaciones de relleno La operación de un relleno con desperdicios peligrosos es muy diferente a la de un relleno convencional. Los detalles específicos varían dependiendo de si los desperdicios se encuentran en recipientes, y si son líquidos o sólidos. Cuando se van a colocar desperdicios peligrosos que se encuentran dentro de recipientes, deben descargarse y colocarse en posición en forma individual, para evitar la ruptura de los recipientes. Para evitar la colocación de recipientes de desperdicios incompatibles, el área total del relleno debe diseñarse de tal manera que tenga partes de almacenamiento separadas, para las diferentes clases de desperdicios compatibles. Por lo general, los desperdicios líquidos se colocan en áreas de contención y se permite que sequen al aire, mediante evaporación solar. En muchos sitios, los desperdicios líquidos se procesan antes de su colocación final, y en algunos casos los desperdicios líquidos se inyectan dentro del terreno. Para los desperdicios secos se utilizan los métodos convencionales de relleno.

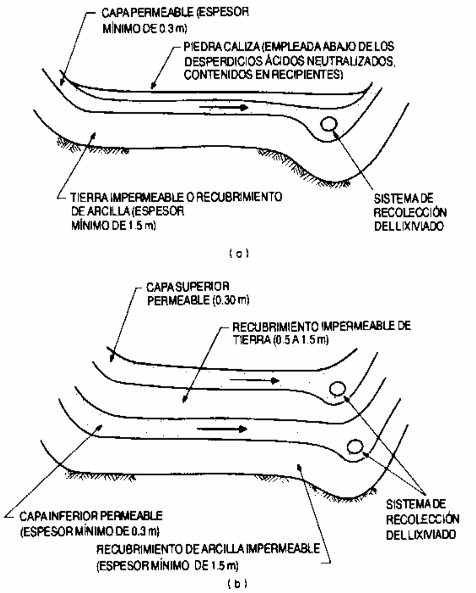


FIG. 26-57 Aspectos especiales de diseño para los rellenos con desperdicios peligrosos, con objeto de evitar la contaminación de los estratos subyacentes. *a*) Sistema de recubrimiento sencillo. *b*) Sistema de recubrimiento doble.

Diseño de los rellenos para desperdicios peligrosos En la actualidad, muchos de los reglamentos que regulan el diseño de los rellenos para desperdicios peligrosos aún no se resuelven. A pesar de que varían los requerimientos específicos, los factores que aparecen en la tabla 26-51 se pueden utilizar como una guía para el proyecto. En la figura 26-57 aparecen algunas precauciones especiales a considerar para prevenir la contaminación de los estratos subyacentes.

Cultivo del terreno El cultivo del terreno es un método de colocación final de los desperdicios en el que se utilizan los procesos biológicos, químicos y físicos que ocurren en la superficie del terreno para tratar los desperdicios industriales biodegradables. Los desperdicios a tratar se pueden colocar sobre la superficie del terreno que ha sido preparada para recibirlos o bien inyectarse bajo la superficie de la tierra (véase la Fig. 26-58).

Descripción del proceso Cuando se agregan desperdicios orgánicos al terreno, éstos se ven sujetos a los siguientes procesos: **1)** descomposición química y bacteriana, **2)** lixiviación de los componentes solubles en agua presentes en los desperdicios originales, así como de los productos de la descomposición, **3)** volatilización de componentes seleccionados presentes en los desperdicios originales y en los productos de descomposición.

Los factores a considerar en la evaluación de la biodegradabilidad de los desperdicios orgánicos al aplicarlos en el relleno incluyen: **1)** la composición del desperdicio, **2)** la compatibilidad de los desperdicios con la microflora del terreno, **3)** los requerimientos ambientales, que incluyen el oxígeno, la temperatura, el pH y los nutrientes inorgánicos, y **4)** el contenido de humedad de la mezcla de desperdicio y el terreno.

A pesar de que la mayor parte de los componentes volátiles se liberan a la atmósfera, una pequeña fracción se disuelve y/o se la lleva el agua en la matriz de la tierra. Los desperdicios lixiviados se transportan a través de las capas de tierra subyacente. La mayor parte de los constituyentes orgánicos contenidos en el líquido lixiviador reciben un tratamiento adicional a medida que pasan por la columna de tierra.

FIG. 26-58 Equi[...] desperdicios líquid[...]

TABLA 26-52 y operación p[...] utilizados par[...]

Partida
Ubicación de la sele[...] tio
Selección del sitio: [...] cas del terreno
Preparación del siti[...]
Caracterización de[...] dicios
Método de aplica[...] desperdicios
Velocidades de a[...] los desperdicio[...]
Manejo del sitio
Monitoreo

FIG. 26-58 Equipo característico utilizado para la inyección subterránea de desperdicios líquidos.

TABLA 26-52 Consideraciones importantes de diseño y operación para los sistemas de cultivo del terreno utilizados para la colocación final de los desperdicios

Partida	Consideraciones
Ubicación de la selección del sitio	La proximidad a áreas críticas está especificada por los reglamentos gubernamentales, el acceso, la geología del sitio y la hidrología
Selección del sitio: características del terreno	El área adecuada para la cubierta del terreno y la profundidad de las aguas subterráneas es mayor por lo general a 1.5 m (4 ft). La pendiente no debe exceder a 5-8%. El tipo de terreno, incluyendo la capacidad de intercambio iónico
Preparación del sitio	Antes de la aplicación de los desperdicios debe cercarse el área, dejarse una pendiente para el control del desagüe y ararse con discos o en surcos
Caracterización de los desperdicios	Los sólidos en suspensión, el contenido orgánico, el nitrógeno (en todas sus formas), el fósforo, pH, y los metales inorgánicos, que incluyen: arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, selenio, plata, sodio y zinc
Método de aplicación de los desperdicios	Caballete y estría, rocío (con sistemas portátiles o fijos), diseminación con carro-tanque, inyección subterránea.
Velocidades de aplicación de los desperdicios	Para petróleo crudo y aceites lubricantes el intervalo es 250 a 1250 barriles/(ha·año), con un valor característico de 400 barriles/(ha·año). El valor característico para los aceites y desperdicios de refinería es aproximadamente de 150 barriles/(ha·año).
Manejo del sitio	Los desperdicios que se diseminan sobre la superficie deben ser arados con discos abresurcos hacia el interior del terreno poco después de su aplicación (1 a 7 días). Para promover condiciones aerobias y la bioconversión rápida de los desperdicios, la mezcla de tierra y desperdicios debe cultivarse en forma periódica.
Monitoreo	Deben tomarse muestras periódicas para determinar la extensión del proceso de bioconversión. Anualmente deben tomarse muestras del núcleo para seguir el movimiento de los desperdicios lixiviados a los estratos subyacentes.

Los desperdicios lixiviados pueden perderse también por arrastre superficial.

Por último, una porción de los desperdicios que se agregan se incorporan a la matriz de la tierra; por este motivo es importante biodegradar al máximo los desperdicios orgánicos agregados. Por esta razón los componentes inorgánicos como, por ejemplo, cadmio, cromo, cobre y plomo también deben controlarse en los desperdicios a colocar por medio del cultivo del terreno.

Aplicaciones El cultivo del terreno es adecuado para desperdicios que contienen constituyentes orgánicos que son biodegradables y no están sujetos a una lixiviación significativa, mientras ocurre el proceso de bioconversión. Por ejemplo, los desperdicios aceitosos del petróleo y los sedimentos aceitosos son ideales para su colocación final por medio del cultivo del terreno. También son adecuados una variedad de otros desperdicios orgánicos con características similares. Los sitios de cultivo del terreno manejados adecuadamente se pueden reutilizar con intervalos frecuentes sin efectos adversos.

Diseño y operación Las consideraciones importantes en el diseño y la operación de los sistemas de cultivo del terreno incluyen: **1)** la selección del sitio, **2)** la preparación del sitio, **3)** las características del desperdicio, **4)** el método de aplicación del desperdicio, **5)** la velocidad de aplicación del desperdicio, **6)** el manejo del sitio, y **7)** el monitoreo. En la tabla 26-52 aparece una relación de los factores importantes relacionados con estas consideraciones de diseño y operación.

Inyección de pozo profundo La inyección de pozo profundo para la colocación final de desperdicios sólidos y líquidos incluye la inyección de los desperdicios a una profundidad considerable dentro de la tierra, en zonas donde se encuentran formaciones rocosas permeables (característicamente de piedra caliza o de dolomita) o cavernas subterráneas.

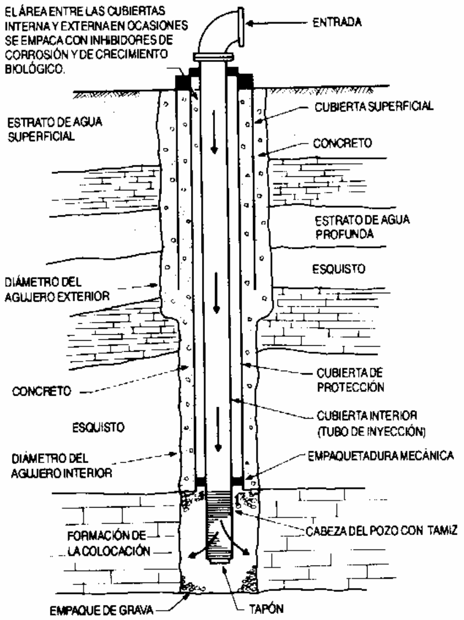


FIG. 26-59 Pozo profundo característico utilizado para la inyección subterránea de desperdicios líquidos.

PERMEABLE DE

lenos con desperdicios
stratos subyacentes. *a*)
miento doble.

rosos En la actua-
iseño de los rellenos
Apesar de que varían
aparecen en la tabla
oyecto. En la figura
considerar para pre-
s.
un método de colo-
an los procesos bio-
ficie del terreno para
s. Los desperdicios a
eno que ha sido pre-
perficie de la tierra

desperdicios orgáni-
es procesos: **1**) des-
de los componentes
ginales, así como de
ión de componentes
ales y en los produc-

a biodegradabilidad
lleno incluyen: **1**) la
l de los desperdicios
os ambientales, que
trientes inorgánicos,
erdicio y el terreno.
tes volátiles se libe-
lve y/o se la lleva el
iviados se transpor-
a mayor parte de los
o lixiviador reciben
a columna de tierra.

TABLA 26-53 Consideraciones importantes de diseño y operación de los pozos profundos, utilizados para la inyección de desperdicios

Partida	Consideraciones
Selección del sitio del pozo	Los criterios para determinar la factibilidad de un sitio para un pozo profundo de inyección incluyen: 1) uniformidad, 2) extensión grande, 3) espesor sustancial, 4) alta porosidad y permeabilidad, 5) baja presión, 6) manto acuífero salino, 7) separación de los horizontes de agua potable, 8) los acuicludes de los estratos inferiores y superiores deben ser adecuados, 9) ausencia de pozos mal tapados en las cercanías, 10) compatibilidad entre los estratos minerales, los fluidos del depósito y los desperdicios inyectados.
Pretratamiento del desperdicio	Los sólidos en suspensión deben ser menores a 10 a 15 mg/l; el tamaño de las partículas debe ser igual o inferior a 1 a 5 μm (dependiendo de la formación de inyección). Puede ser necesario el ajuste y el amortiguamiento del pH de los desperdicios.
Instalación del pozo profundo	La profundidad del pozo varía entre 550 y 366 m (1800 y 1200 ft); las velocidades de inyección al pozo varían de 4 a 6 l/s; las velocidades características están en el intervalo de 15 a 20 l/s; se utilizan presiones de operación hasta de 27 600 kPa (4000 psig).
Monitoreo	Se debe instalar un monitoreo continuo de las instalaciones, cuando los pozos se ponen en operación, pues las irregularidades en la presión pueden requerir cambios en los procedimientos.

Descripción del proceso La instalación de pozos profundos para la inyección de desperdicios es igual a la utilizada en la perforación de pozos petroleros y de gas. Con objeto de aislar y proteger los mantos acuíferos potenciales de suministros de agua, la cubierta superficial debe llegar bastante más abajo de dichos mantos acuíferos y cementarse hasta la superficie del pozo (véase la Fig. 26-59). No debe permitirse que el fluido de perforación penetre en la formación que se va a utilizar para la colocación final de los desperdicios. Para evitar el taponamiento de la formación, el fluido de perforación se reemplaza por una solución compatible. Además, en algunos casos puede ser necesario el tratamiento ácido de la formación antes de la inyección de los desperdicios.

TABLA 26-54 Acciones a corto y largo plazo para el manejo efectivo de los desperdicios sólidos industriales*

Acciones	Consideraciones
A corto plazo	
1. Inventario	Documenténse todos los tipos, cantidades y fuentes de desperdicios (peligrosos o no peligrosos).
2. Inventario de los sitios inactivos	Debe hacerse un inventario de todos los sitios inactivos donde se han colocado desperdicios en el pasado. Deben recopilarse datos de los desperdicios enterrados, incluyendo tipos, cantidades y fuentes. Debe desarrollarse un programa de estudio constante del agua subterránea.
3. Caracterización de los desperdicios	Además de la información general sobre las características de los desperdicios, todos los desperdicios peligrosos deben caracterizarse en forma individual.
4. Asignación de responsabilidades	Asígnense responsabilidades y autoridad en la planta y oficinas para el almacenamiento, recolección, tratamiento y colocación final de todos los tipos de desperdicios peligrosos.
5. Rastreo del movimiento de los desperdicios	Desarróllese un sistema de registro para los desperdicios peligrosos, que contenga: fecha, descripción del desperdicio, fuente, volumen embarcado o redondeado, nombre del remolcador y destino. Deben utilizarse técnicas de seguimiento para asegurarse de que los desperdicios llegan a su destino.
6. Desarrollo de procedimientos de emergencia	Desarróllense procedimientos para las situaciones de emergencia, que incluyan el almacenamiento, la recolección, el tratamiento y la colocación final de los desperdicios peligrosos.
7. Obtención de los permisos	Obténganse los permisos necesarios para la colocación final de los desperdicios tan pronto como sea posible.
A largo Plazo	
1. Eliminación de todos los desperdicios acumulados	Desarróllese un programa sistemático para la eliminación de todos los desperdicios acumulados que se almacenan en la planta.
2. Separación de los desperdicios	Prepárese un programa a largo plazo para separar los desperdicios en la fuente de producción.
3. Reducción de los desperdicios	Debe ponerse en marcha un programa sistemático para examinar todas las fuentes de producción de desperdicios y desarrollar operaciones y procesos opcionales para reducir su generación.
4. Mejoramiento de las instalaciones	Mejórense las instalaciones para cubrir los requerimientos de RCRA. Debe instituirse un programa de recopilación de datos para obtener los necesarios.
5. Revisión de todos los acuerdos sobre el manejo de los desperdicios	Desarróllense los contratos detallados con empresas externas encargadas del manejo de los desperdicios. Defínanse claramente las obligaciones y responsabilidades del personal de la planta y el encargado de la recolección de desperdicios.
6. Revisión y desarrollo de las opciones de los sitios de colocación final	Desarróllense programas a largo plazo para los requerimientos de rellenos e iníciense los programas para asegurar los sitios necesarios
7. Aprovisionamiento de los servicios adecuados de ingeniería y consultoría	Debe tenerse la seguridad de que el departamento de ingeniería se incorpora a tiempo al proceso. Manténganse consultores externos para las tareas específicas.
8. Atención a los nuevos reglamentos	Desarróllese un programa para estar al día respecto a los nuevos reglamentos, que incorpore las modificaciones y desarrollo de las nuevas leyes publicadas por las agencias locales, estatales y federales.

*Adaptado en parte de R. Sobel, "How Industry Can Prepare for RCRA", *Chem. Eng.*, **86**(1), 82 (enero 29, 1979).

Aplicaciones La inyección de pozo profundo se ha utilizado principalmente para desperdicios líquidos que son difíciles de tratar y cuya colocación final por los métodos convencionales presenta problemas, asimismo, para la colocación final de los desperdicios peligrosos. Los desperdicios de la industria química, petroquímica y farmacéutica son los que, por lo general, utilizan este método de colocación final. El desperdicio puede ser líquido, gaseoso o sólido. Los gases y los sólidos se disuelven en el líquido o se transportan por medio de él.

Diseño y operación Las consideraciones importantes de diseño y operación para la inyección de pozo profundo están relacionados con: 1) la selección del sitio del pozo, 2) el pretratamiento, 3) la instalación de un pozo de inyección, y 4) el monitoreo. En la tabla 26-53 aparecen los factores importantes relacionados con estas consideraciones de diseño y operación. Como se observa en la tabla, por lo general los desperdicios son tratados antes de la inyección para prevenir el taponamiento de la formación y el daño al equipo. Las partículas mayores de 1 a 5 μm deben ser eliminadas. Por lo general, los desperdicios también deben ser compatibles con las características del manto acuífero. Esto puede requerir un ajuste de pH y el empleo de soluciones amortiguadoras compatibles.

Colocación de los desperdicios sólidos en el océano A pesar de que arrojar al mar los desperdicios sólidos municipales fue una práctica que se abandonó en Estados Unidos desde 1933, el concepto ha persistido a través de los años y aún se analiza hoy con frecuencia. Algunos desperdicios industriales todavía se descargan en el mar. En estos últimos años se ha abandonado la idea de que el océano es un sumidero gigantesco en el cual podemos arrojar una cantidad infinita de todos los tipos de contaminantes. Por otra parte, se argumenta que muchos de los desperdicios que actualmente se colocan en rellenos o sobre el terreno podrían utilizarse como fertilizantes para incrementar la productividad del océano. También se argumenta que la colocación de los desperdicios en los fondos marinos donde se presentan fallas tectónicas es un método eficaz para deshacerse de ellos.

PLANEACIÓN

Ya que cada día se incrementa el número de reglamentos federales que regulan la colocación final de desperdicios sólidos peligrosos y no peligrosos, es prudente desarrollar programas de acción tanto a corto como a largo plazo para tratar todos los aspectos del manejo de desperdicios sólidos. En la tabla 26-54 se resumen los aspectos importantes de las acciones a corto y largo plazo.

Sección 27

Ingeniería bioquímica

Henry R. Bungay, P.E., Ph.D., *Professor of Chemical and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute; Member, American Institute of Chemical Engineers, American Chemical Society, American Society of Microbiology, American Society for Engineering Education. (Editor de la sección)*

George T. Tsao, Ph.D., *Director, Laboratory of Renewable Resource Engineering, Purdue University; Member, American Institute of Chemical Engineers, American Chemical Society, American Society for Microbiology*

Arthur E. Humphrey, Ph.D., *Provost, Lehigh University; Member, U.S. National Academy of Engineering; Member, American Institute of Chemical Engineers, American Chemical Society, American Society for Microbiology*

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA BIOQUÍMICA

CONCEPTOS BIOLÓGICOS

Células 27-3
Bacterias 27-3
Algas 27-3
Hongos 27-4
Virus 27-4
Bioquímica 27-4
Energía 27-5
Mutación e ingeniería genética 27-5
Fotosíntesis 27-5

REACTORES BIOLÓGICOS

Fermentadores 27-6
Transferencia de oxígeno 27-9
Sistemas rociadores 27-10
Escalamiento 27-11
Esterilización 27-12

RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO

MODELADO DEL PROCESO

Modelos estructurados 27-16
Cultivos continuos 27-16
Análisis matemático 27-16
Reciclaje 27-17
Cultivos mixtos 27-18
Computadoras e instrumentación 27-19

CINÉTICA DE LAS REACCIONES ENZIMÁTICAS

Ingeniería de la inmovilización de la enzima y la
enzima inmovilizada 27-20
Reactores enzimáticos 27-21

REFERENCIAS GENERALES: Aiba, S., A. E. Humphrey y N. F. Millis, *Biochemical Engineering*, 2d ed., University of Tokyo Press, Tokyo, 1973. Atkinson, B., *Biochemical Reactors*, Pion, London, 1974. Bailey, J. E. y D. F. Ollis, *Biochemical Engineering Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1977. Bungay, H. R., *Energy: The Biomass Options*, Wiley, New York, 1981. Bushell, M. E. y J. H. Slater (eds.), *Mixed Culture Fermentations*, Academic, New York, 1981. Calcott, P. H., *Continuous Cultures of Cells*, vols. I y II, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1981. Chibata, I., S. Fukiu y L. B. Wingard, *Enzyme Engineering*, vol. 6 of series, Plenum, New York, 1982. Goldstein, I. S. (ed.), *Organic Chemicals from Biomass*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1981. Grady, C. P. L., Jr. y H. C. Lim, *Biological Wastewater Treatment: Theory and Applications*, Marcel Dekker, New York, 1980. Hollaender, A., R. Rabson, P. Rogers, A. San Pietro, R. Valentine y R. Wolfe, *Trends in the Biology of Fermentation for Fuels and Chemicals*, Plenum, New York, 1982. Kirk, T. K., *Lignin Biodegradation: Microbiology,*

Chemistry, and Potential Applications, vols. I and II, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1980. Klass, D. L. (ed.), *Biomass as a Nonfossil Fuel Source*, CRC Press, Boca Raton. Fla, 1981. Moo-Young y varios coautores, *Advances in Biotechnology: Proceedings of the 6th International Fermentation Symposium, London, Canada*, 4 vols., Pergamon, New York, 1981. Peppler, H. J. y D. Perlman, *Microbial Technology*, Academic, New York, 1979. Rose, A. H. (ed.), *Economic Microbiology Series*, Academic, New York, anualmente. San Pietro, A. (ed.), *Biochemical and Photosynthetic Aspects of Energy Production*, Academic, New York, 1980. Smith, J. E., D. R. Berry y B. Kristiansen (eds.), *Fungal Biotechnology*, Academic, New York, 1980. Sofer, S. S. y O. R. Zaborsky (eds.), *Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels*, Plenum, New York, 1981. Solomons, G. L., *Materials and Methods in Fermentation*, Academic, New York, 1969. Stafford, D. A., D. L. Hawkes y H. R. Horton, *Methane Production from Waste Organic Matter*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1980. Vogt, F. (ed.), *Energy Conservation and the Use of Renewable Energies in the Bio-Industries*, Pergamon, New York, 1981. Wang, D. I. C., C. L. Cooney, A. L. Demain, P. Dunnill, A. E. Humphrey y M. D. Lilly, *Fermentation and Enzyme Technology*, Wiley, New York, 1979. Wise, D. L. (ed.), *Fuel Gas Production from Biomass*, vols I and II, CRC Press, Boca Raton, Fla, 1981. Wiseman, A., *Principles of Biotechnology*, Surrey University Press, Glasgow, 1982.

Nomenclatura y unidades

Símbolo	Definición	Unidades SI	Unidades usuales en Estados Unidos
A	Constante empírica	Adimensional	Adimensional
C	Concentración (masa)	kg/m^3	lb/ft^3
C	Concentración	mol/m^3	$(lb \cdot mol)/ft^3$
D	Diámetro	m	ft
D	Difusividad real	m^2/s	ft^2/h
D	F/V	s^{-1}	h^{-1}
DRT	Tiempo de reducción decimal para la esterilización	s	h
E	Energía de activación	cal/mol	$Btu/(lb \cdot mol)$
F	Velocidad de flujo o alimentación	m^3/s	ft^3/h
H	Concentración de organismos huéspedes	kg/m^3	lb/ft^3
K	Coeficiente de velocidad	Las unidades dependen del orden de la reacción	Las unidades dependen del orden de la reacción
K_M	Constante de Michaelis	kg/m^3	lb/ft^3
$K_l a$	Coeficiente masivo de transferencia de masa	s^{-1}	h^{-1}
K_d	Coeficiente de mortalidad	s^{-1}	h^{-1}
K_s	Coeficiente de Monod	kg/m^3	lb/ft^3
k	Constantes cinéticas	Dependen del orden de la reacción	Dependen del orden de la reacción
M	Coeficiente para la energía de mantenimiento	Adimensional	Adimensional
N	Número de organismos o esporas	Adimensional	Adimensional
P	Concentración del producto	kg/m^3	lb/ft^3
Q_{O_2}	Coeficiente de la velocidad de respiración específica	$kg\ O_2/(kg\ organismos \cdot s)$	$lb\ O_2/(lb\ organismos \cdot h)$
R	Constante de la ley universal de los gases	$8314\ J/(mol \cdot K)$	$0.7299\ (ft^3)(atm)/(lb \cdot mol \cdot R)$
r	Posición radial	m	ft
S	Concentración del sustrato	kg/m^3	lb/ft^3
S	Esfuerzo cortante	N/m^2	lb/ft^2
S_0	Concentración del sustrato en la alimentación	kg/m^3	lb/ft^3
T	Temperatura	K	°F
t	Tiempo	s	h
V	Velocidad de reacción	mol/s	$(lb \cdot mol)/h$
V_m	Velocidad máxima de reacción	mol/s	$(lb \cdot mol)/h$
V	Velocidad del aire	m/s	ft/h
V	Volumen del fermentador	m^3	ft^3
V	Derivada de la concentración del producto [Ec. (27-30)]	$kg/(m^3 \cdot s)$	$lb/(ft^3 \cdot h)$
VVM	Volumen de aire/volumen del licor de fermentación por minuto	Adimensional	Adimensional
X	Concentración de organismos	kg/m^3	lb/ft^3
Y	Coeficiente de rendimiento	$kg/kg\ O_2$	$lb/lb\ O_2$
		Símbolos griegos	
β	Constante adimensional de Michaelis	Adimensional	Adimensional
ΔE	Energía de activación	cal/mol	$Btu/(lb \cdot mol)$
μ	Coeficiente de la velocidad de crecimiento específico	s^{-1}	h^{-1}
$\hat{\mu}$	Coeficiente de la velocidad máxima de crecimiento específico	s^{-1}	h^{-1}
ω	Razón de recirculación	Adimensional	Adimensional
ϕ	Módulo de Thiele	Adimensional	Adimensional

Las diferencias entre
están en los principi
en la naturaleza de l
las células o de las en
condiciones en que p
siguiente, los parám
biosistemas, son tam
la temperatura, el pol
tos, una cepa o espe
abrumadora. Sin em
de perjudicar las vel
nantes prosperen. E
en los de tratamiento
ción en cambio cons
el control y compor
químicas complicad
das, de poblaciones
componentes prese
ciles. La estabilidad
metida por una de l
conjunto, y los cont

Células La cél
nismos multicelula
das, pero muchos c
pesar de que difier
mún los mismos a
plasma, un sistema
una solución comp
inorgánicas. El cit
permeable, en form
te de moléculas al i
tienen la informaci
locados en secuen
Como las unidades
ticas celulares que
En la mayor part
una membrana par
núcleos organizad
intercelulares sirv
celulares. Por ejem
mados cloroplasto
En las bacterias
dos por una memb
celular. La clorofil
branas vagamente
bacteria tiene clor
tóforos vesiculare
se denominan pro
Las células de l
protegidas por rígi
las células. Cierto
nosas de materiale
Tres grupos de c
bioquímica: las b
protozoarios, se a

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA BIOQUÍMICA

Las diferencias entre ingeniería bioquímica e ingeniería química no están en los principios de las operaciones y procesos unitarios, sino en la naturaleza de los sistemas vivos. La explotación comercial de las células o de las enzimas tomadas de las células está restringida a las condiciones en que pueden funcionar los sistemas biológicos; por consiguiente, los parámetros moderados, que son la mayor ventaja de los biosistemas, son también el principal problema. A exactamente el pH, la temperatura, el potencial de oxidación-reducción y el medio correctos, una cepa o especie determinada debe lograr una predominancia abrumadora. Sin embargo, la operación en diferentes condiciones puede perjudicar las velocidades y permitir que los organismos contaminantes prosperen. En los sistemas de cultivos mixtos, especialmente en los de tratamiento biológico de los desperdicios, existe una interacción en cambio constante entre las poblaciones y sus medios que afecta el control y comportamiento. La optimización de las actividades bioquímicas complicadas de cepas o especies aisladas, de células agregadas, de poblaciones mezcladas y de enzimas libres de células o sus componentes presenta retos a la ingeniería que son complejos y difíciles. La estabilidad de los sistemas biológicos se puede ver comprometida por una de las muchas etapas bioquímicas que funcionan en conjunto, y los controles genéticos están sujetos a mutación. El nacimiento de mutantes especializados que dan lugar a altas concentraciones de productos tiende a retroceder durante la propagación hacia especies menos productivas, un fenómeno conocido como agotamiento. En esta sección se recalcan los procesos microbianos y la catálisis enzimática; los sistemas médicos, animales y de ingeniería agrícola se omitieron debido a limitaciones de espacio. Los aspectos de ingeniería relacionados con el tratamiento biológico de los desperdicios se trataron en la sección 26. A pesar de que las bebidas fermentadas se han producido durante varios miles de años, la ingeniería bioquímica aún no está madura. Los desarrollos recientes como, por ejemplo, las células y enzimas inmovilizadas han sido explotados en parte, pero muchos avances emocionantes están aún por venir. La ingeniería genética nos conduce a procesos prácticos para las moléculas que antes sólo se encontraban en pequeñas cantidades en los tejidos de las plantas y animales. Los procesos de fermentación que en la actualidad son importantes para productos relativamente valiosos pueden verse opacados por los procesos químicos masivos más económicos. A medida que los precios de los productos petroquímicos aumentan, existen grandes beneficios que se pueden obtener con las fermentaciones, para producir compuestos equivalentes.

CONCEPTOS BIOLÓGICOS

Células La célula es la unidad de la vida. Las células en los organismos multicelulares funcionan junto con otras células especializadas, pero muchos organismos son seres vivos de una sola célula. A pesar de que difieren en su forma, tamaño y funciones, tienen en común los mismos aspectos básicos. Todas las células contienen citoplasma, un sistema coloidal de compuestos bioquímicos grandes en una solución compleja de moléculas orgánicas más pequeñas y sales inorgánicas. El citoplasma está limitado por una membrana celular permeable, en forma selectiva y semielástica, que controla el transporte de moléculas al interior y exterior de la célula. Los genes, que contienen la información para el control de la actividad celular, están colocados en secuencia a lo largo de un cromosoma en forma de hilo. Como las unidades de la herencia, los genes determinan las características celulares que pasan de una generación a la siguiente.

En la mayor parte de las células, los cromosomas están rodeados por una membrana para formar un núcleo conspicuo. Las células con sus núcleos organizados se describen como eucarióticas. Otras estructuras intercelulares sirven como sitios especializados para las actividades celulares. Por ejemplo, la fotosíntesis se realiza por los organelos llamados cloroplastos.

En las bacterias y algas verdiazules, los cromosomas no están rodeados por una membrana y, en apariencia, existe poca organización subcelular. La clorofila de las algas verdiazules está asociada con membranas vagamente arregladas, dentro del citoplasma. Cuando una bacteria tiene clorofila, se trata de un tipo único, ubicado en los cromatóforos vesiculares. Si carecen de núcleos discretos, estos organismos se denominan procarióticos.

Las células de las plantas, las bacterias y las algas verdiazules están protegidas por rígidas paredes celulares externas a las membranas de las células. Cierto tipo de algas y protozoarios tienen cubiertas gelatinosas de materiales inorgánicos como, por ejemplo, sílice.

Tres grupos de organismos son de especial interés para la ingeniería bioquímica: las bacterias, las algas y los hongos. Un cuarto grupo, los protozoarios, se alimenta de organismos más pequeños en las aguas naturales y en los procesos de tratamiento de desperdicios. Ciertos virus llamados fagos también son importantes y pueden infectar los microorganismos y destruir todo un cultivo.

Bacterias Las bacterias son organismos diminutos de una sola célula, cuyo tamaño varía de 0.5 a 20 μm, a pesar de que pueden ser más pequeñas y unas cuantas exceden 100 μm de longitud. Las paredes de la célula imparten a la célula una característica redonda y ovoide, con forma de varilla o espiral. Algunas bacterias pueden tener una forma diferente, que depende de las condiciones del cultivo; esto se conoce como "pleomorfismo". Ciertas especies se caracterizan por la disposición de las células en racimos, cadenas o paquetes discretos. Se pueden formar pigmentos que les imparten un color característico. El citoplasma de las bacterias también puede contener varios gránulos de materiales almacenados como, por ejemplo, carbohidratos y lípidos. Muchas bacterias muestran motilidad, por medio de uno o más apéndices en forma de pelo llamados flagelos. Las bacterias se reproducen al dividirse en partes iguales, proceso conocido como "fisión binaria".

En condiciones adversas, ciertos microorganismos producen esporas que germinan si llegan a encontrar un medio favorable. Las esporas pueden soportar condiciones extremas de sequedad y temperatura. Otros microorganismos forman esporas en una etapa de su ciclo normal de vida.

En circunstancias adecuadas, muchas especies pueden rodearse de un material gelatinoso, que sirve como medio de unión y brinda protección contra otros organismos. Si muchas células comparten la misma cubierta gelatinosa, se dice que tienen limo; de otra manera, se dice que cada una tiene una cápsula.

Cada una de las especies de microorganismos se desarrolla mejor dentro de cierto intervalo de pH y temperatura, por lo general entre 20 y 40°C y no muy lejos del pH neutro. Sin embargo, existen algunas especies que prosperan en los valores extremos.

Algas Las algas son un grupo muy variado de organismos fotosintéticos, que van desde un tamaño microscópico hasta la gigantesca alga marina, que puede alcanzar longitudes hasta de 20 m (66 ft). Algu-

nos productos bioquímicos comerciales provienen de las algas marinas, que suministran oxígeno y consumen nutrientes, en los diferentes procesos de tratamiento biológico de los desperdicios. A pesar de que sus rápidas velocidades de desarrollo, en relación con las otras plantas verdes, ofrecen un elevado potencial para producir biomasa, como materia prima para la obtención de energía o productos químicos, las algas se utilizan poco en los procesos de fermentación industrial. Se está desarrollando un nuevo proceso con la *Dunaliella*, una especie que crece en aguas de gran salinidad y produce glicerol. Los estanques exteriores son buenos para el crecimiento de las algas, porque se necesitan superficies grandes y con alta iluminación.

Hongos Como grupo, los hongos se caracterizan por ser cuerpos vegetales simples, cuyas estructuras de reproducción son complejas. Todas las células de los hongos tienen núcleos distintos, y en cierta etapa de sus ciclos de vida producen esporas, en órganos productores especializados. Los hongos no contienen clorofila y, en consecuencia, requieren fuentes de moléculas orgánicas complejas. Muchas especies crecen sobre materia orgánica muerta, en tanto que otras viven como parásitas. Muchas pueden vivir sobre carbohidratos, nitrógeno inorgánico y sales.

Las levaduras son organismos unicelulares rodeados por una pared celular y con núcleos distintos. Salvo algunas excepciones, las levaduras se reproducen mediante un proceso conocido como gemación; una pequeña célula nueva brota de la célula padre pero, en ciertas condiciones, una célula individual de levadura puede convertirse en un órgano productor de esporas y producir cuatro de ellas.

Virus Los virus son partículas cuyo tamaño es inferior a la resolución de un microscopio de luz, no tienen estructura celular y están compuestos principalmente por ácido nucleico, rodeado por una cubierta de proteína. A falta de un mecanismo metabólico, los virus sólo existen como parásitos intercelulares en huéspedes muy específicos. Muchas bacterias y ciertos mohos están sujetos a la invasión por partículas de virus. Los que atacan a las bacterias se llaman bacteriófagos y pueden ser virulentos o benignos. Los bacteriófagos virulentos desvían los recursos celulares a la fabricación de partículas de fagos. A medida que las nuevas partículas de fagos se liberan al medio, la célula huésped muere y se destruye. Los bacteriófagos benignos no tienen efecto inmediato sobre la célula huésped. Se unen al cromosoma bacteriano y pueden vivir muchas generaciones antes de convertirse en virulentos, por algún fenómeno físico o químico.

Bioquímica Todos los organismos requieren carbono, nitrógeno, azufre, fósforo, agua y trazas de otros elementos. Algunos requieren también vitaminas específicas. Las plantas verdes sólo necesitan dióxido de carbono, iones de nitrato o amonio, minerales disueltos y agua para fabricar todos sus componentes celulares. Las bacterias fotosintéticas requieren fuentes específicas de iones de hidrógeno y las bacterias quimiosintéticas deben tener un sustrato oxidable. Algunos microorganismos son capaces de "fijar" el nitrógeno atmosférico, por reducción. Los organismos que sólo utilizan compuestos inorgánicos simples como nutrientes se denominan autotróficos (autoalimentarios).

Los organismos que requieren compuestos que han sido fabricados por otros organismos se llaman heterótrofos (es decir, que se nutren unos de otros). Muchos heterótrofos secretan enzimas (exoenzimas), que hidrolizan las moléculas grandes y las transforman en más pequeñas que pueden entrar fácilmente a la célula.

Las proteínas son macromoléculas que desempeñan papeles como, por ejemplo, servir como componentes de las membranas celulares y de los músculos. Los anticuerpos que protegen a los organismos contra la invasión de sustancias extrañas son en sí proteínas. Existen aproximadamente 20 aminoácidos que se encuentran de manera usual en las proteínas en forma de polipéptidos. Dada la gran longitud de las cadenas proteínicas y las diferentes secuencias de aminoácidos, el número posible de proteínas es incalculable. La secuencia de un aminoácido se conoce como estructura primaria de una proteína. Por lo general, la cadena de polipéptidos se duplica para proporcionar una estructura secundaria a la molécula y los enlaces a través de otros grupos funcionales forman la estructura terciaria. Algunas moléculas de proteína tienen un arreglo espacial, que forma agregados definidos conocidos como estructura cuaternaria de las proteínas. Para que un polímero de polipéptido tenga actividades biológicas, incluyendo las actividades catalíticas de las enzimas, es necesaria una estructura molecular determinada, que incluye no sólo las estructuras primaria y secundaria, sino también la terciaria y, en ocasiones, la estructura cuaternaria. Estos requerimientos estructurales estrictos explican la alta especificidad de las proteínas. En presencia de ciertos reactivos químicos, calor excesivo, radiación, pH desfavorable, etc., la estructura de la proteína puede desorganizarse. Este fenómeno se conoce como desnaturalización y puede ser reversible, si no es muy grave.

Una clase especial de proteínas, las enzimas, son catalizadores biológicos que aceleran las reacciones, al disminuir la cantidad de activación requerida. Las enzimas funcionan junto con otra clase especial de compuestos, llamados coenzimas, que no son proteínas. Muchas de las coenzimas conocidas incluyen vitaminas, como, por ejemplo, niacina y riboflavina, en su estructura molecular. Las coenzimas transportan grupos reactivos o electrones entre los sustratos de moléculas, en el curso de una reacción. Ya que las coenzimas sirven exclusivamente como portadores y se reciclan constantemente, sólo se necesitan pequeñas cantidades para producir gran cantidad de productos bioquímicos.

En las células se llevan a cabo cientos de reacciones en forma simultánea. Existen trayectorias ramificadas y paralelas, y un agente bioquímico determinado puede participar en varias reacciones distintas. A través de la acción de masas, los cambios de concentración causados por una reacción pueden afectar la cinética y las concentraciones de equilibrio de otra. Para prevenir la acumulación en exceso de un agente bioquímico, el producto o un intermedio en la trayectoria de la reacción puede reducir la producción de una enzima, o bien inhibir la actividad de las enzimas existentes. Éstas se denominan "control de retroalimentación" y se muestra en la figura 27-1. Se conocen ejemplos más complicados, en los cuales dos agentes bioquímicos actúan en conjunto para inhibir una enzima. Como la acumulación de cantidades excesivas de ciertos agentes bioquímicos puede ser la clave para el éxito económico, la creacción de cultivos mutantes con controles metabólicos defectuosos es muy valiosa.

La eficiencia de la célula mejora al omitir la síntesis de enzimas innecesarias; por consiguiente, existen dos clases de enzimas, las que son constitutivas y siempre se producen y las que se sintetizan en respuesta a un inductor, por lo general el sustrato inicial de una trayectoria. Las enzimas que se inducen en un organismo pueden ser constitutivas en otro.

Los microorganismos muestran preferencias nutricionales. Las enzimas de los sustratos comunes como, por ejemplo, la glucosa son constitutivas, como lo son las enzimas de las trayectorias metabólicas comunes. Además, la síntesis de enzimas por ataque sobre sustratos menos comunes como, por ejemplo, la galactosa, se ve bloqueada por la presencia de cantidades apreciables de sustratos comunes o metabolitos. Por lo tanto, es lógico que las células conserven sus recursos para la síntesis de enzimas mientras sus sustratos comunes se encuentran fácilmente disponibles. Si se presentan con sustratos mixtos, aquellos que están en las principales trayectorias metabólicas se consumen en forma simultánea, mientras que los otros sustratos se consumen después de que los sustratos comunes se han agotado. La curva de crecimiento diaúxico tiene una parte plana, mientras se sintetizan las enzimas necesarias para los sustratos no comunes (véase la Fig. 27-2). También pueden existir preferencias para los sustratos menos comunes, de tal manera que una mezcla muestra una secuencia de una que se ha agotado antes de que se inicie el metabolismo de la siguiente.

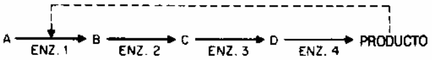


FIG. 27-1 Control de retroalimentación. El producto inhibe la primera enzima.

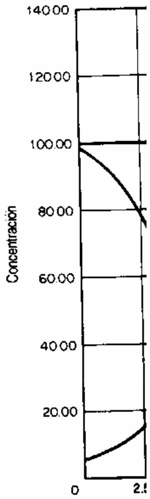


FIG. 27-2 Crecimie

Energía Much ceden en forma esp drólisis y los rearre pontáneas. La sep ejemplo, da por re reacciones bioquím quieren un suminis to se cubre por med energía con otra qu ce una cantidad suf de compuestos qu ejemplo, el adenosi minal del fosfato, s con liberación de e ATP se vuelve a fo

En los sistemas ción es la elimina hidrógeno es el mé dinucleótida (NDA dan a la oxidación oxidación están ac que una puede da o el consumo esca pulsoras en cada p global.

El potencial glo la cantidad de ener Cuando está prese la oxidación comp tidad de energía m aguas contaminad gares, casi no exis nismos desarrolla obtener pequeñas que algunos prod trayectorias de ox cia de oxígeno pu bico de tal forma

iidos conocidos co-
jue un polímero de
ndo las actividades
ıra molecular deter-
a y secundaria, sino
cuaternaria. Estos
lta especificidad de
ímicos, calor exce-
de la proteína pue-
) desnaturalización

ı catalizadores bio-
cantidad de activa-
ra clase especial de
ínas. Muchas de las
or ejemplo, niacina
nzimas transportan
le moléculas, en el
en exclusivamente
lo se necesitan pe-
productos bioquí-

ıes en forma simul-
y un agente bioquí-
ciones distintas. A
ntración causados
concentraciones de
xceso de un agente
rectoria de la reac-
bien inhibir la acti-
nan "control de re-
conocen ejemplos
uímicos actúan en
ición de cantidades
er la clave para el
con controles me-

íntesis de enzimas
le enzimas, las que
e sintetizan en res-
al de una trayecto-
ıeden ser constitu-

ricionales. Las en-
lo, la glucosa son
torias metabólicas
jue sobre sustratos
e ve bloqueada por
omunes o metabo-
n sus recursos para
ınes se encuentran
ıs mixtos, aquellos
as se consumen en
se consumen des-
La curva de creci-
sintetizan las enzi-
iase la Fig. 27-2).
atos menos comu-
uencia de una que
de la siguiente.

→ PRODUCTO
4

be la primera enzima.

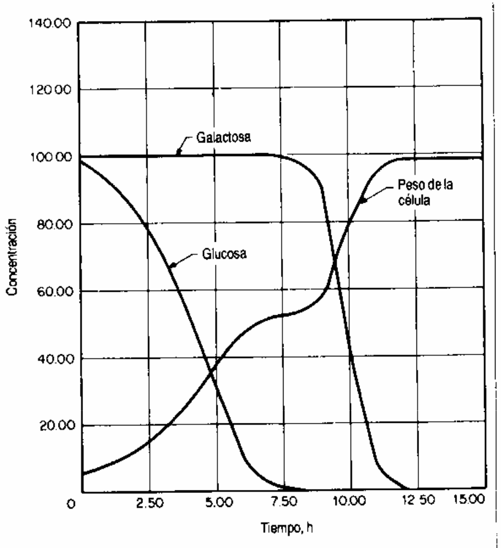


FIG. 27-2 Crecimiento diaúxico.

Energía Muchas reacciones metabólicas, una vez iniciadas, proceden en forma espontánea con una liberación neta de energía. La hidrólisis y los rearreglos moleculares son ejemplos de reacciones espontáneas. La separación hidrolítica del almidón a glucosa, por ejemplo, da por resultado una liberación neta de energía. Muchas reacciones bioquímicas no son espontáneas y, en consecuencia, requieren un suministro de energía. En los seres vivos, este requerimiento se cubre por medio del acoplamiento de una reacción que requiere energía con otra que libera energía. Si una reacción metabólica produce una cantidad suficiente de energía, se puede utilizar para la síntesis de compuestos que requieren gran cantidad de energía como, por ejemplo, el adenosintrifosfato (ATP). Cuando se rompe el enlace terminal del fosfato, se forman adenosindifosfato y un fosfato inorgánico con liberación de energía. Cuando se dispone de suficiente energía, el ATP se vuelve a formar.

En los sistemas biológicos, el mecanismo más frecuente de oxidación es la eliminación de hidrógeno. Por el contrario, la adición de hidrógeno es el método común de reducción. La nicotinamida-adenina dinucleótida (NDA) y su fosfato (NADP) son dos coenzimas que ayudan a la oxidación y reducción. La mayor parte de las reacciones de oxidación están acopladas a reacciones de reducción, de tal manera que una puede dar por resultado la otra. Sin embargo, la liberación o el consumo escalonado de energía requiere fuerzas y pérdidas impulsoras en cada paso, de tal manera que se ve afectada la eficiencia global.

El potencial global de oxidación-reducción de un sistema determina la cantidad de energía que las células pueden obtener de sus nutrientes. Cuando está presente el oxígeno para ser el aceptor final de electrones, la oxidación completa de las moléculas orgánicas proporciona la cantidad de energía máxima. Sin embargo, dentro de los animales, en las aguas contaminadas, en el fondo de las aguas naturales y en otros lugares, casi no existe o no hay oxígeno libre. En estos medios, los organismos desarrollan lo que puede oxidar parcialmente los sustratos u obtener pequeñas cantidades de energía, producto de reacciones en las que algunos productos se oxidan mientras que otros se reducen. Las trayectorias de oxidación completa pueden estar ausentes y la presencia de oxígeno puede romper el mecanismo del metabolismo anaeróbico de tal forma que la célula muere rápidamente. Las diferencias en eficiencia son notables. El metabolismo aeróbico de una molécula de glucosa puede generar energía de enlace correspondiente a 33 moléculas de ATP, en tanto que el metabolismo anaeróbico proporciona sólo dos moléculas de ATP. Los procesos anaeróbicos naturales acumulan compuestos como etanol, acetoína, acetona, butanol, lactato y malato. Los productos del metabolismo aerobio natural son el agua y el dióxido de carbono. Los procesos aeróbicos de importancia comercial producen masa celular valiosa o utilizan mutantes especiales para acumular productos como los antibióticos.

Mutación e ingeniería genética La exposición de los organismos a agentes como el gas mostaza, los rayos ultravioleta y los rayos X incrementa la velocidad de mutación por daño a los cromosomas. Existen pocos sobrevivientes a un tratamiento tan intensivo y algunas de estas células son los mutantes. La mayor parte de las mutaciones son perjudiciales para la célula, pero un pequeño número tiene importancia económica, porque algunos controles se deterioran, lo que da por resultado mayores rendimientos de producto. El tamizado de los diferentes esfuerzos para encontrar los pocos que realmente sirven, justifica un estudio más detallado, tedioso y costoso.

En tanto que los agentes mutagénicos suprimen los genes, las técnicas de recombinación de DNA agregan características deseables de material genético procedentes de células muy distintas. Los genes provienen de las células de las plantas, los animales y los microbios o, en algunos casos, se pueden sintetizar en el laboratorio si se conocen las secuencias del ácido nucleico en los genes naturales. Abrir un cromosoma y unir el DNA extraño es fácil teóricamente, pero existen complicaciones. Los genes en fragmentos de DNA deben tener señales de control de otras secuencias del ácido nucleico para que funcionen. Tanto el gen como sus controles deben ser empalmados en los cromosomas del cultivo receptor. Los cromosomas de las bacterias (moléculas circulares de DNA, llamados plásmidos) están cortados con enzimas, mezclados con nuevos fragmentos a incorporar y cerrados enzimáticamente. Cada plásmido se reproduce muchas veces durante la división de la célula; por consiguiente, el organismo ha adquirido nuevas cualidades.

Existen artes y trucos en la ingeniería genética, como, por ejemplo, utilizar una infección con bacteriófagos para introducir un gen o una enzima en una célula. Ciertas especies como, por ejemplo, *E. coli*, *Bacillus subtilis*, la levadura y los estreptomices, son los organismos de trabajo comunes (vectores de obstrucción), a los cuales se agregan los genes, porque su genética propia está bien comprendida y la metodología se ha vuelto rutinaria.

LECTURAS RECOMENDADAS: S. Broome y W. A. Gilbert, *Proc. Nat. Acad. Sci. (U.S.A.)*, **72**, 3961 (1978); S. N. Cohen, A. C. Y. Chang, H. W. Boyer y R. B. Hellings, *Proc. Nat. Acad. Sci. (U.S.A.)*, **70**, 3240 (1973); H. A. Erlich, S. N. Cohen y H. O. McDevitt, *Cell*, **13**, 681 (1978); D. O. Nathans. *Science*, **206**, 903 (1979); A. Skalka y L. Shapiro, *Gene*, **1**, 65 (1976).

Fotosíntesis Todas las células vivas sintetizan ATP, pero sólo las plantas verdes y algunos microorganismos pueden realizar las reacciones bioquímicas para formar ATP con energía radiante, a través del proceso de la fotosíntesis. El número por célula de organelos rodeados de una membrana llamada cloroplasto varía según las especies y las condiciones del medio. En las plantas superiores se encuentran varios cloroplastos en cada célula de tejido mesófilo de las hojas, en tanto que una célula de alga puede contener un solo cloroplasto. El cloroplasto tiene un "emparedado" de muchas capas que alternan pigmentos y proteínas enzimáticas, de tal manera que la excitación electromagnética de la luz se transforma en energía de enlace químico. Los organismos procarióticos —las bacterias y las algas verdiazules (clorofitas)— no tienen cloroplastos. En su lugar, sus sistemas fotosintéticos están relacionados con la membrana celular o con las estructuras laminares ubicadas en los organelos conocidos como cromatóforos. Éstos, a diferencia de los cloroplastos no están rodeados por una membrana.

Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más grupos de pigmentos verdes llamados clorofilas. Además, pueden contener pigmentos secundarios que imparten colores característicos a las células.

El resultado neto de la fotosíntesis es la reducción del dióxido de carbono para formar carbohidratos. Un compuesto intermedio clave es el ácido fosfoglicérico, y varios azúcares simples reaccionan y se desproporcionan a medida que se incorpora el carbono del dióxido de carbono.

REACTORES BIOLÓGICOS

Fermentadores Por lo general, las fermentaciones comerciales se realizan asépticamente en recipientes que se mantienen bajo una presión positiva de aire estéril para evitar la entrada de microorganismos contaminantes. Sin embargo en la producción de organismos patógenos, para propósitos médicos o para la guerra biológica, dichos recipientes se operan a baja presión, porque la seguridad de los operadores de la planta es más importante que la integridad del producto. En el tratamiento biológico de los desperdicios se utilizan cultivos de microorganismos seleccionados en equipo relativamente abierto. La fermentación se distinguía antiguamente por ser un proceso en el cual el oxígeno estaba ausente, pero en la actualidad el término se ha extendido a los procesos aeróbicos.

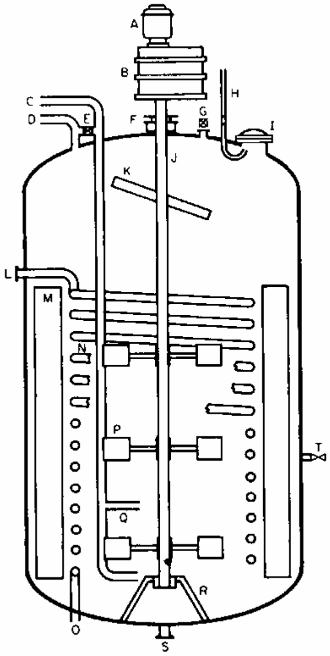


FIG. 27-3 Fermentador intermitente convencional. *A* = motor del agitador; *B* = mecanismo reductor de velocidad; *C* = entrada de aire; *D* = salida de aire; *E* = válvula de desviación de aire; *F* = sello del eje; *G* = mirilla con luz; *H* = mirilla de la línea de limpieza; *I* = agujero de hombre con mirilla; *J* = eje del agitador; *K* = paleta para romper la espuma; *L* = salida del agua de enfriamiento; *M* = placa desviadora; *N* = serpentines de enfriamiento; *O* = entrada del agua de enfriamiento; *P* = mezclador; *Q* = rociador; *R* = cojinete y soporte del eje; *S* = salida (el sello de vapor no se muestra); *T* = válvula de muestreo (el sello de vapor no se muestra). En el diagrama no aparecen los peldaños de la escalera para mantenimiento, la probeta de antiespumante, el sistema de antiespumante y los sensores (pH, oxígeno disuelto, temperatura, etc.). Obsérvese que 1) los serpentines pueden estar entre las placas desviadoras y la pared del tanque, 2) los serpentines pueden conectarse a la parte superior, para llevar al máximo las aberturas bajo el nivel de agua, y 3) son factibles las entradas por la parte inferior para los mezcladores.

Las funciones deseadas en la fermentación son el contacto gas-líquido, la detección sobre la línea de las concentraciones, el mezclado, la transferencia de calor, el control de la espuma y la alimentación de nutrientes o reactivos como, por ejemplo, el utilizado para el control de pH. El caballo de batalla de la industria de la fermentación es el fermentador intermitente convencional, como el que aparece en la figura 27-3. Existe mucha tubería de proceso y los accesorios de cobre o latón se evitan, por los efectos altamente perjudiciales del cobre en muchos sistemas biológicos. Por ejemplo, se ha observado más del 50% de reducción en el rendimiento de las fermentaciones de penicilina cuando se coloca una válvula de bronce en la línea de alimentación. Para tanques más grandes deben utilizarse serpentines de enfriamiento o circulación, a lo largo de intercambiadores de calor externos, porque el área de una chaqueta es inadecuada para el enfriamiento desde la temperatura de esterilización hasta la de operación en un tiempo razonable. Las chaquetas pueden ser inadecuadas para las fermentaciones con un mezclado intensivo, para satisfacer la demanda de aereación y el calor metabólico, producto de la rápida respiración y desarrollo de los microorganismos. Algunos aspectos interesantes para un fermentador convencional son que: **1**) una válvula de desviación en el sistema de aire permite la desviación del aire para que la espuma no sea excesiva y el potencial de oxidación-reducción no sea demasiado elevado durante la primera etapa de la fermentación, cuando se comienza a establecer el inóculo; **2**) se agrega antiespumante cuando la espuma excesiva llega a una probeta electrónica de conductividad o capacitancia, **3**) toda la tubería está protegida contra la contaminación, mediante el empleo de vapor, **4**) el nivel del líquido al llenar el recipiente está determinado por una referencia, respecto a una gráfica de calibración basada en los puntos dentro del tanque, como un travesaño en una escalera; **5**) el peso del contenido del tanque se puede determinar mediante un balance hidrostático contra el aire que burbujea lentamente a través del rociador y **6**) las bombas son poco comunes, porque es más fácil transferir el fluido desde un recipiente a presión.

La necesidad de una transferencia altamente eficiente de oxígeno en las fermentaciones, como las que utilizan hidrocarburos, ha dado por

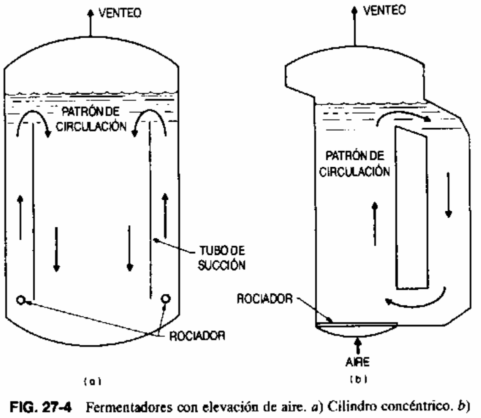


FIG. 27-4 Fermentadores con elevación de aire. *a*) Cilindro concéntrico. *b*) Recirculación externa.

FIG. 27-5 Fermenta

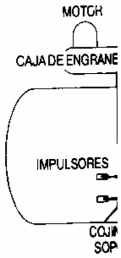


FIG. 27-6 Fermenta

resultado los ferm
muestra en la figur
diseñado para prod
drocarburos, y está
100 m (328 ft) de al
Se ha intentado h
ro ninguno se ha v
fermentador para a
El rendimiento no f
la forma convenci
mentadores más gr
consta de un cilindr
rece en la figura 27
do en los recipiente
La fermentación
de un producto que
cepas o especies d
de alcohol más lent
y las cepas del vin
etanol son muy len
eliminación del alc
en la figura 27-7. E
agua-alcohol a la
104°F)]. La produ

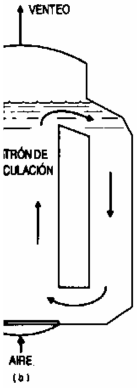
MEDI

FERME

FIG. 27-7 Vacufer

ccionan y se despro-
l dióxido de carbono.

el contacto gas-líqui-
ones, el mezclado, la
y la alimentación de
izado para el control
a fermentación es el
que aparece en la fi-
accesorios de cobre
iciales del cobre en
observado más del
ntaciones de penici-
a línea de alimenta-
erpentines de enfria-
es de calor externos,
el enfriamiento des-
ración en un tiempo
s para las fermenta-
r la demanda de ae-
da respiración y de-
os interesantes para
ula de desviación en
ra que la espuma no
in no sea demasiado
ción, cuando se co-
spumante cuando la
de conductividad o
ra la contaminación,
ido al llenar el reci-
cto a una gráfica de
, como un travesaño
ie se puede determi-
re que burbujea len-
poco comunes, por-
iente a presión.
ciente de oxígeno en
rburos, ha dado por



lindro concéntrico. *b*)

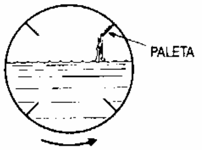


FIG. 27-5 Fermentador rotatorio.

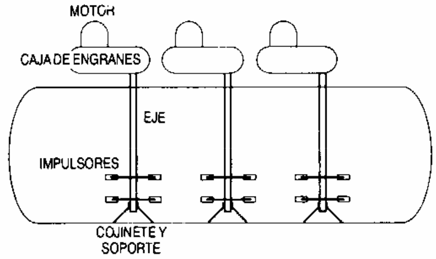


FIG. 27-6 Fermentador horizontal.

resultado los fermentadores con elevación de aire, como el que se muestra en la figura 27-4. El fermentador más grande del mundo fue diseñado para producir una proteína de una sola célula, a partir de hidrocarburos, y está en Billingham, Inglaterra. Dicho fermentador tiene 100 m (328 ft) de altura y un diámetro de 10 m (32.8 ft).

Se ha intentado hacer algunos cambios al fermentador estándar, pero ninguno se ha vuelto popular. Un diseño obsoleto en el cual gira el fermentador para aerear la parte de enmedio aparece en la figura 27-5. El rendimiento no fue satisfactorio y las unidades se reconstruyeron en la forma convencional, con rociadores y agitadores. Uno de los fermentadores más grandes, utilizado para la fabricación de antibióticos, consta de un cilindro horizontal con varios agitadores como el que aparece en la figura 27-6. Los agitadores múltiples también se han utilizado en los recipientes cilíndricos verticales.

La fermentación del etanol es un buen ejemplo de la acumulación de un producto que inhibe los cultivos microbianos. La mayor parte de cepas o especies de levadura tienen una velocidad de producción de alcohol más lenta, cuando el etanol alcanza aproximadamente 10% y las cepas del vino, o sake, que logran más del 20% en volumen de etanol son muy lentas. Un sistema conocido como Vacuferm, para la eliminación del alcohol por destilación a medida que se forma, aparece en la figura 27-7. El vacío se ajusta a la presión de vapor de la mezcla agua-alcohol a la temperatura de fermentación [(30 a 40°C) (86 a 104°F)]. La productividad volumétrica es bastante mejor que en un

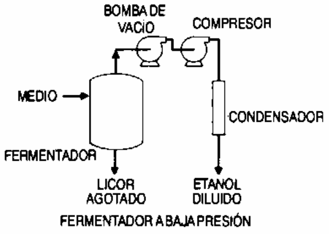


FIG. 27-7 Vacuferm.

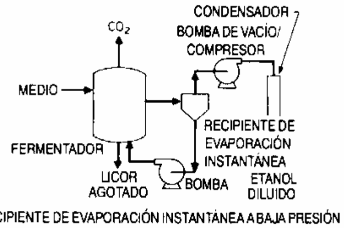


FIG. 27-8 Fermentador con recipiente de evaporación instantánea.

fermentador convencional, pero tiene la gran desventaja de tener que recomprimir grandes volúmenes de vapor, de tal manera que el alcohol se pueda condensar con el agua normal de enfriamiento, en vez de utilizar una salmuera fría costosa. Además, las grandes cantidades de dióxido de carbono generadas por la fermentación se evacúan y recomprimen junto con los vapores de alcohol y agua. Un mejor diseño es el que aparece en la figura 27-8, en el cual el fermentador opera a la presión normal, para liberar el dióxido de carbono. Se recircula caldo o licor a través de la olla de vaporización para evaporar el etanol. A pesar de que este sistema parece tener un ahorro atractivo de energía, por la eliminación del calor metabólico en los vaporizadores; la inversión inicial y el costo de bombeo de los vapores son elevados. La operación del fermentador de etanol a temperaturas más elevadas con organismos termofílicos es más económica, porque se requiere un vacío y una recompresión menores, debido a la presión de vapor más elevada. Otras opciones para superar la inhibición producida por el producto son la extracción del caldo o licor de fermentación con un disolvente inmiscible y/o la operación con cultivos muy densos, para que la baja productividad por célula se vea compensada por la obtención de muchas más células.

Se pueden lograr concentraciones más densas de células mediante la separación de las células a la salida y su recirculación al fermentador. Esta ha sido una práctica estándar durante muchos años en el tratamiento biológico de los desperdicios, cuando las corrientes diluidas de alimentación dan por resultado un crecimiento lento del cultivo. La producción de flóculos celulares, que se recoleccionan fácilmente por sedimentación, se ve mejorada por la recirculación de las células que se sedimentan. Esta es una ventaja selectiva que puede permitir que aquellas células dominen. La fermentación industrial puede afrontar mayores gastos que el tratamiento de los desperdicios, y las centrífugas para recolectar las células son comunes. El reciclaje de células de levadura a un fermentador de etanol puede disminuir considerable-mente el tiempo de fermentación. Ciertas células muy coaguladas pueden quedar en el fermentador. La torre de fermentación mostrada en la figura 27-9 utiliza este principio, con cepas o especies de levadura que flocu-

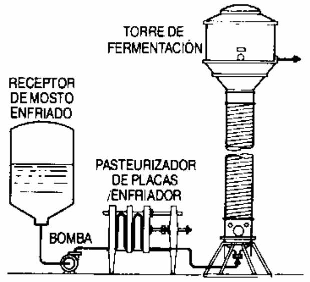


FIG. 27-9 Torre de fermentación. (*Cortesía de APV Corp.*)

TABLA 27-1 Comparación de los fermentadores de etanol

Sistema	Tiempo característico h	Concentración característica de etanol, %
Convencional	72	10
Con recirculación de células	12	8
Torre de fermentación	3	8
Inmovilización con gel	1	10

lan en forma natural. Las células se pueden mantener también en el reactor mediante la unión a un soporte. En ocasiones, el vinagre se produce en un "generador" relleno de virutas de madera, a las que se unen las bacterias. Materiales de apoyo hechos con rocas o plástico se utilizan en los filtros de espesamiento para el tratamiento de los desperdicios (véase la Secc. 26). Existen agentes químicos que pueden enlazar las células a los materiales de apoyo cuando la adsorción simple no las mantiene lo suficientemente sujetas. El atrapamiento con gel puede proporcionar concentraciones extremadamente elevadas de células, porque las células siguen multiplicándose dentro del gel. Comparaciones de los resultados obtenidos con la fermentación del etanol aparecen en la tabla 27-1.

La fermentación se puede combinar con otras operaciones. Por ejemplo, la inhibición de retroalimentación de la hidrólisis enzimática de la celulosa se puede aligerar mediante la eliminación de la glucosa producida por medio de su fermentación a medida que ésta se forma.

Las válvulas y bombas que tienen una trayectoria potencial para la contaminación de los microorganismos son un tabú para las operaciones asépticas. Las válvulas cuyo vástago se eleva pueden llevar a los organismos al lado estéril por el movimiento de entrada y salida que efectúa la válvula. Las válvulas de diafragma todavía se emplean, pero el calentamiento, el enfriamiento y la abrasión producida por los sólidos en el medio nutriente presentan condiciones severas que llevan a la ruptura ocasional de un diafragma con la consiguiente contaminación de la corrida. Las válvulas de globo o de tapón no brindan un sello absoluto contra el medio exterior, pero la dirección del movimiento no deja entrar los organismos al sistema. La contaminación rara vez se puede atribuir a estas válvulas; están diseñadas para un mantenimiento fácil y tienen una ventaja grande desde el punto de vista humano, pues con un vistazo a la manija se puede saber si la válvula está abierta o cerrada. Muchas corridas se han echado a perder porque una válvula manual se ha dejado en la posición incorrecta. Para las operaciones de planta, las bombas de diafragma son satisfactorias. En el laboratorio o en una planta piloto predominan las bombas peristálticas (también conocidas como exprimidores de turbina).

Por lo general, la transferencia de fluidos en una planta de fermentación utiliza las diferencias de presión de aire. Uno o más cabezales múltiples pueden interconectar muchos recipientes y como la transferencia tiene que ser aséptica, los cabezales se presurizan con vapor en el momento en que se van a utilizar. Un arreglo característico de los sellos de vapor se muestra en la figura 27-10.

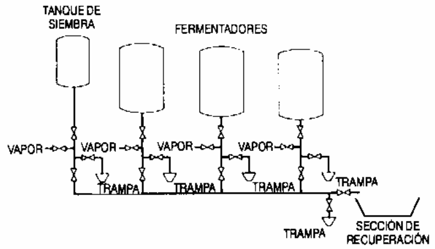


FIG. 27-10 Cabezal de inoculación y cosecha.

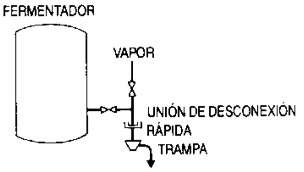


FIG. 27-11 Tubería de la línea de muestreo. (Puede tener una válvula al drenaje, que permita la desviación de la trampa, mientras se enfría la línea.)

Las líneas de muestreo también tienen sellos de vapor. Un arreglo característico aparece en la figura 27-11. En posición cerrada, el vapor proporciona una barrera absoluta contra la contaminación. Para tomar una muestra, se cierran las líneas de vapor y la de la trampa, y el medio de fermentación se deja fluir hasta desperdiciarse y hasta que la línea se sienta fría, para que los productos sensibles no den resultados falsos por destrucción térmica. El enfriamiento toma hasta 5 L del medio si no se realiza con cuidado y las prácticas erróneas pueden desperdiciar una cantidad mucho mayor. Los tanques para planta piloto tienen menos accesorios masivos que se pueden enfriar más fácilmente. Se desperdicia menos medio, pero el sobremuestreo hasta el punto en que el volumen del fermentador sea bajo puede ser un problema. Por este motivo se han desarrollado métodos opcionales de muestreo. Por ejemplo, se puede utilizar una aguja y jeringa estéril para muestrear a través de un diafragma de hule, colocado en la pared del tanque. A pesar de que dichos métodos son confiables en apariencia, existe una tendencia a desechar todas las innovaciones y regresar al método comprobado de los sellos de vapor cuando en una fábrica se detecta un periodo de contaminación.

Durante el periodo de esterilización toda la tubería del fermentador se sopla con vapor. Un método para la limpieza de las mirillas utiliza condensado, que es estéril por naturaleza, en un brazo inmóvil. La presión del vapor atrás del condensado empuja el agua a las mirillas; si no se limpian, las salpicaduras o rocíos pueden cubrir rápidamente a las mirillas con una capa gruesa de microorganismos y medio.

A pesar de que es fácil agregar materiales a la fermentación, su eliminación es difícil. Se han instalado dispositivos de membrana en los fermentadores o en los circuitos externos de reciclaje, para dializar los compuestos solubles. Las células liberan a veces desperdicios o

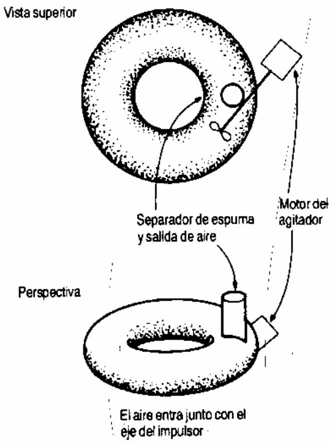


FIG. 27-12 Fermentador toroidal.

metabolitos que pue
res de atascamiento,
concentraciones de
los cultivos de contr
Otro diseño nuev
27-12. El movimien
cuado con el aire. U
aire se muestra en la
moderada y es arras
hidrostática, que pr
ferencia de gas. En e
los gases se expand
circulación. Se han
vadores.
Los sustratos sóli
agitar cuando la con
el 10%. Para la sac
mantener alta la co
poración. En un rea
la madera dan por r
evitado mediante la
de la solución a tra
agrega más. Se pue
mados en la colum
Transferencia d
ciente de oxígeno
fermentadores aeró
saturación con aire
mg/L de oxígeno. E
disuelto en unos cu
transferencia de m
embargo, este fenó
gicos con aereació
burbujas es muy d
incorporar en el co
l significa que la r
transferencia para
geno. La relación
chaelis-Menten (v
geno limita la ve

FIG. 27-13 Ferme

metabolitos que pueden ser inhibidores; éstos se conocen como factores de atascamiento. La eliminación por diálisis ha permitido que las concentraciones de células sean de 10 a 100 veces la concentración de los cultivos de control.

Otro diseño nuevo es el fermentador toroidal mostrado en la figura 27-12. El movimiento en una dirección axial permite un mezclado adecuado con el aire. Un caso especial del fermentador con elevación de aire se muestra en la figura 27-13. La alimentación entra a una presión moderada y es arrastrada hacia abajo, a regiones de muy alta presión hidrostática, que proporciona una gran fuerza impulsora para la transferencia de gas. En el otro brazo, al disminuir la presión se permite que los gases se expandan, proporcionando el impulso necesario para la circulación. Se han construido unidades experimentales en ejes de elevadores.

Los sustratos sólidos como, por ejemplo, la madera, no se pueden agitar cuando la concentración de la lechada excede aproximadamente el 10%. Para la sacarificación, anterior a la fermentación del etanol, mantener alta la concentración de azúcar puede evitar el paso de evaporación. En un reactor intermitente, las limitaciones de mezclado con la madera dan por resultado una solución diluida de azúcar. Esto se ha evitado mediante la colocación de la madera en una columna y el paso de la solución a través de ella. A medida que se disuelve la madera, se agrega más. Se pueden fermentar simultáneamente los azúcares formados en la columna.

Transferencia de oxígeno El suministro de una cantidad suficiente de oxígeno puede ser todo un reto a la ingeniería en algunos fermentadores aeróbicos. El oxígeno es muy poco soluble en agua. La saturación con aire a la temperatura ambiente proporciona sólo 6 a 7 mg/L de oxígeno. En un proceso vigoroso se puede agotar el oxígeno disuelto en unos cuantos segundos cuando se detiene la aereación. La transferencia de masa de gases a líquidos se trata en la sección 18. Sin embargo, este fenómeno es en parte diferente para los sistemas biológicos con aereación por burbujas. Ya que el número y tamaño de las burbujas es muy difícil de estimar, el área de transferencia se suele incorporar en el coeficiente de transferencia de masa, K_la. El subíndice l significa que la resistencia de la película líquida debe controlar la transferencia para gases muy poco solubles, como es el caso del oxígeno. La relación entre la concentración de oxígeno es del tipo Michaelis-Menten (véase la Fig. 27-26). Cuando, en un proceso, el oxígeno limita la velocidad, también se incrementa rápidamente la

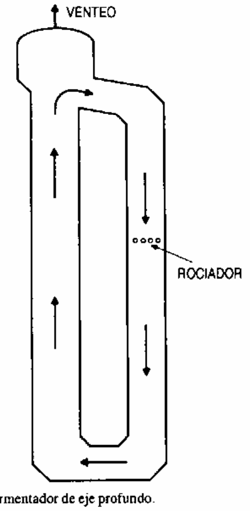


FIG. 27-13 Fermentador de eje profundo.

velocidad específica de respiración (Q_{O_2}), hasta llegar a una porción plana de la curva. La concentración por debajo de la cual la respiración se ve muy limitada se conoce como "concentración crítica de oxígeno", que, en forma característica, varía entre 0.5 y 2.0 ppm para las bacterias, la levadura y los hongos bien dispersados, que crecen entre 30 y 40°C (86 a 104°F). Arriba de esta concentración crítica, la toma específica de oxígeno se incrementa ligeramente al aumentarse la concentración de oxígeno.

Una gráfica de la velocidad específica de respiración, Q_{O_2}, en función del coeficiente de crecimiento específico, es lineal con la intercepción sobre el eje de ordenadas igual a la velocidad de toma de oxígeno para el mantenimiento de la célula. Una formulación de lo anterior es:

Velocidad de toma = toma de mantenimiento + toma de crecimiento

$$Q_{O_2}X = (Q_{O_2})_M X + \mu X\,(1/Y_G) \tag{27-1}$$

donde X es la concentración de organismos, Y_G es el rendimiento de masa celular por unidad de masa de oxígeno y el término Q significa las velocidades de toma de oxígeno en masa de O_2/masa de organismos.

Este tipo de correlación se aplica a casi todos los sustratos incluidos en el metabolismo de la energía celular y está apoyada por datos experimentales y consideraciones energéticas. Sin embargo, está basada en suposiciones verdaderas en condiciones de equilibrio a régimen permanente o cerca de ellas y puede no ser válida durante los estados transitorios. La ecuación de la toma de oxígeno debe modificarse cuando se pueden identificar otras actividades celulares que requieren oxígeno. Por ejemplo, el uso de oxígeno para la formación del producto se puede representar por

Velocidad de toma = toma de mantenimiento + toma de crecimiento + toma del producto

$$Q_{O_2}X = (Q_{O_2})_M X + \frac{dX}{dt}\frac{1}{Y_G} + \frac{dP}{dt}\frac{1}{Y_P} \tag{27-2}$$

donde P es la concentración del producto, y Y_P es el rendimiento de la masa de producto por unidad de masa de toma de oxígeno. La toma de oxígeno se distribuye entre la toma para el crecimiento y la que requieren las actividades celulares que dependen de la concentración de células.

Como la velocidad de transferencia de oxígeno en condiciones de régimen permanente debe ser igual a la toma de oxígeno, K_la se puede calcular a partir de

$$K_la = \text{velocidad total de toma de oxígeno}/(C^* - C)_{\text{media}} \tag{27-3}$$

donde C representa la concentración de oxígeno en las burbujas de gas, C^* es la concentración de oxígeno en el líquido que está en equilibrio con la concentración de burbujas de gas y K_la es la velocidad volumétrica de transferencia de oxígeno.

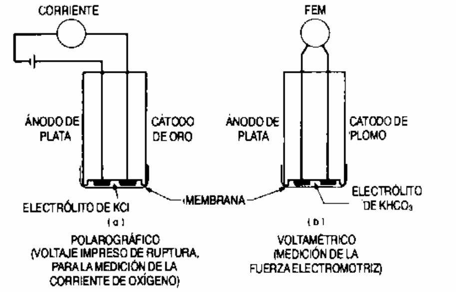


FIG. 27-14 Electrodos para el oxígeno disuelto. *a*) Polarográfico (voltaje impreso de ruptura, para la medición del contenido de oxígeno). *b*) Voltamétrico (medición de la fuerza electromotriz).

Un método conveniente para medir las velocidades de transferencia de oxígeno en los sistemas microbianos es el de los electrodos de oxígeno disuelto, con tiempos de respuesta relativamente rápidos. Se dispone de electrodos de oxígeno muy económicos para utilizarse con los sistemas abiertos, y hay electrodos esterilizables con vapor para los sistemas asépticos. Existen dos tipos básicos de electrodos: uno desarrolla un voltaje a partir de una celda electroquímica, basada en el oxígeno, y el otro consta de una celda polarográfica, cuya corriente depende de la velocidad con que llega el oxígeno (véase la Fig. 27-14). La medición de las propiedades de transferencia del oxígeno requiere sólo una breve interrupción del suministro de oxígeno. Un balance de masa para el oxígeno es

$$dO/dt = \text{velocidad de suministro} - \text{velocidad de toma} \qquad (27\text{-}4)$$

Un rastreo de la señal del electrodo durante un ciclo de aereación de volteo de encendido y apagado se muestra en la figura 27-15. La velocidad de suministro es igual a cero (después de que han escapado las burbujas) en la primera parte de la curva de respuesta; por consiguiente, la pendiente es igual a la velocidad de toma de los organismos. Cuando se reanuda la aereación, se aplican tanto los términos de velocidad de suministro como los de toma. Los valores de $(C^* - C)$ se pueden calcular a partir de los datos. Por consiguiente, con base en la pendiente de la curva de respuesta en un punto dado, todos los valores de la ecuación son conocidos, salvo K_La, que se puede despejar.

Los estudios de la velocidad de aereación cuando el fermentador se ha llenado con soluciones de productos químicos oxidables tienen poco valor para determinar las velocidades en los sistemas biológicos. No sólo difieren los modelos de flujo y el tamaño de las burbujas, sino también los agentes surfactivos y las partículas en suspensión que pueden perjudicar mucho la transferencia de gas. En la figura 27-16 se aprecia el efecto de las diferentes partículas. En general, las partículas esféricas tienen poco efecto, y lo tienen mayor las alargadas; las enredadas perjudican considerablemente la transferencia. Como muchos cultivos de moho están entrelazados y se encuentran presentes lípidos y proteínas con fuerte actividad superficial, la transferencia de oxígeno en la fermentación puede ser mucho más lenta que la que se tiene con la soluciones acuosas simples.

Rara vez se considera el dióxido de carbono en las fermentaciones, pero desempeña un papel importante. Su participación en el equilibrio del carbonato afecta el pH. La eliminación del dióxido de carbono por fotosíntesis puede elevar el pH a más de 10 en cultivos de algas densos y bien iluminados. Varias reacciones bioquímicas incluyen dióxido de carbono; por consiguiente, su cinética y las concentraciones de equilibrio dependen de las concentraciones de gas, y las velocidades metabólicas de las reacciones asociadas también pueden cambiar. Se ha intentado incrementar las velocidades de transferencia de oxígeno al elevar la presión, para obtener una mayor fuerza de impulso, pero en ocasiones da por resultado un mal rendimiento del proceso, que se puede atribuir a un exceso de dióxido de carbono disuelto.

Sistemas rociadores Los rociadores de gas se analizan con detalle en la sección 18. En las fermentaciones industriales son deseables los rociadores con grandes aberturas, para evitar el taponamiento debido al desarrollo de los microbios. Se utilizan agujeros o difusores relativamente pequeños en las unidades de sedimento activado para el tratamiento biológico de los desperdicios, aunque por lo general existe un medio para sacar una sección del aereador fuera del recipiente con objeto de limpiarla. Los diseños recientes de fermentadores están concebidos como una respuesta al problema de transferencia de oxígeno. El fermentador con elevación de aire (Fig. 27-4) crea un mezclado íntimo del aire y el medio, ya que utiliza la flotabilidad del gas para mezclar el fluido.

Las sustancias surfactivas también producen espuma, que puede ser tan perjudicial que la mayor parte del contenido del fermentador se pierda. Los dispositivos mecánicos antiespumantes son útiles, pero no pueden funcionar solos, salvo cuando hay poca propensión a la formación de espuma. Los rompedores mecánicos de espuma rompen las

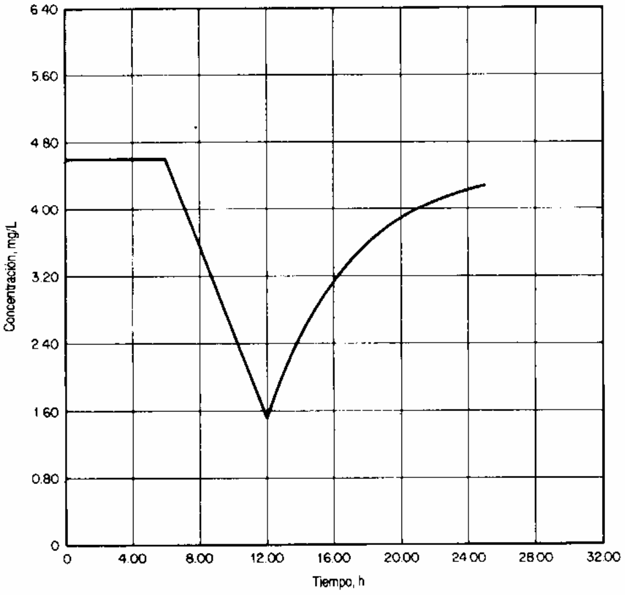


FIG. 27-15 Medición dinámica de K_La.

:ran presentes lípidos
ınsferencia de oxíge-
la que la que se tiene

ı las fermentaciones,
ación en el equilibrio
óxido de carbono por
tivos de algas densos
s incluyen dióxido de
:ntraciones de equili-
as velocidades meta-
eden cambiar. Se ha
rencia de oxígeno al
de impulso, pero en
l proceso, que se pue-
uelto.
se analizan con deta-
triales son deseables
el taponamiento de-
agujeros o difusores
ento activado para el
por lo general existe
ra del recipiente con
entadores están con-
ferencia de oxígeno.
:rea un mezclado ín-
lad del gas para mez-

puma, que puede ser
ı del fermentador se
es son útiles, pero no
opensión a la forma-
espuma rompen las

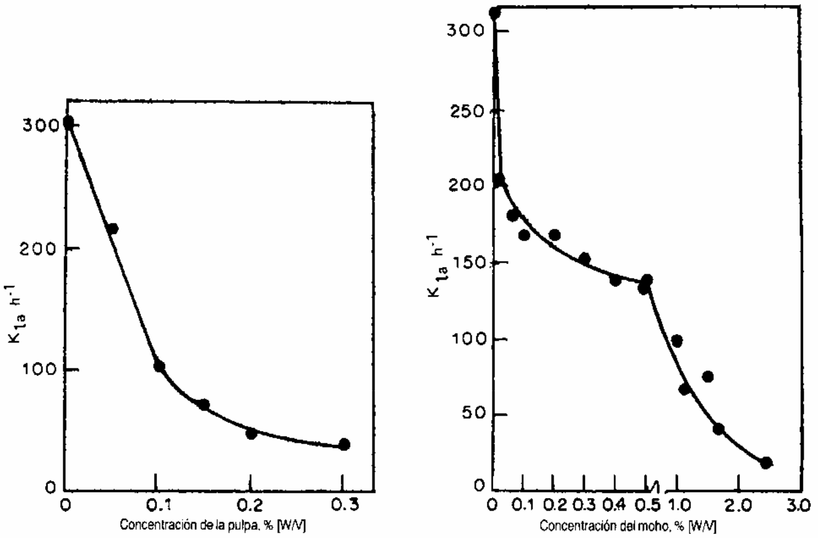


FIG. 27-16 Efecto de los sólidos sobre K_la. Condiciones de operación: velocidad del agitador, 800 rpm; flujo de aire, 2.5 L/min. [M.R. Briely y R. Steel, *Appl. Microbiol.*, 7, 57, (1959). (Cortesía de la American Society for Microbiology.)]

burbujas grandes y débiles, aunque permiten que las pequeñas y resistentes se acumulen. Los agentes surfactivos antiespumantes tienden a reducir la elasticidad de las burbujas, de tal manera que los golpes mecánicos se puedan transmitir fácilmente y favorezcan la ruptura. Varios sistemas de suministro de antiespumante aparecen en la figura 27-17. Algunos lípidos utilizados como antiespumantes son metabolizados por el cultivo y deben reemplazarse. La nutrición suministrada por estos aceites puede ser benéfica, pero son mucho más costosos que sus equivalentes, los nutrientes carbohidratados. Además, es un problema tener la nutrición asociada al control de espuma. Varios agentes antiespumantes que no son nutrientes tienden a persistir. Su tendencia a perderse, al recubrir las superficies de los sólidos en el fermentador, significa que ocasionalmente deben agregarse más agentes. Varios agentes antiespumantes sintéticos son tóxicos para algunos microorganismos, pero uno de los muchos tipos disponibles suele ser satisfactorio.

Escalamiento Los fermentadores que varían desde 2 hasta más de 100 L (0.07 a 3.5 ft^3) se han utilizado para la investigación y el desarrollo. Los de tamaño más pequeño proporcionan muy poco volumen

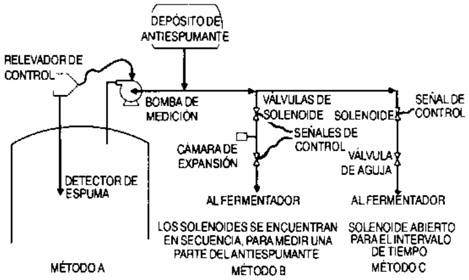


FIG. 27-17 Sistemas de antiespumante.

para el muestreo y son difíciles de duplicar, en tanto que los recipientes grandes son muy costosos y utilizan demasiado medio. La meta al utilizar un equipo pequeño es proporcionar guías para el diseño de las unidades de gran tamaño. Los refinamientos menores se realizan mejor en el equipo de producción, mientras que la planta piloto se utiliza para tamizar los amplios intervalos de variables.

Un medio eficaz de escalamiento para los procesos aeróbicos consiste en medir el nivel de oxígeno disuelto que es adecuado para el equipo pequeño y para ajustar las condiciones de la planta hasta alcanzar este nivel de oxígeno disuelto. Sin embargo, algunas fermentaciones de antibióticos, así como la producción de levadura para forraje a partir de sustratos de hidrocarburos, tienen requerimientos muy estrictos y los diseñadores están muy presionados para suministrar el oxígeno suficiente.

Los métodos antiguos de escalamiento para los procesos de fermentación se basaban en la similaridad geométrica, al utilizar las dimensiones físicas proporcionales. Se pensó que al aplicar la misma potencia por unidad de volumen que se tenía en la planta piloto, esto daría un rendimiento equivalente del proceso en los fermentadores grandes. Las fermentaciones de antibióticos requieren una potencia del mezclador que varía de 0.2 a 2 kW/m^3 (0.1 a 1 hp/100 gl). Como los dispositivos de mezclado tienen áreas (dimensiones cuadradas) para suministrar un volumen (dimensiones cúbicas), los métodos basados en la similaridad dimensional son fundamentalmente inadecuados. El escalamiento que se basa en el coeficiente de transferencia de oxígeno equivalente k_la es razonablemente satisfactorio.

El número de Reynolds del impulsor y las ecuaciones para la potencia de mezclado de partículas en suspensión se presentaron en la sección 19. La dispersión de gases en líquidos se analiza en la sección 18. Por lo general, un incremento en la agitación mecánica es más eficaz, para mejorar la transferencia de masa, que un aumento en la velocidad de aereación.

Otros factores del escalamiento son el esfuerzo cortante, el tiempo de mezclado, el número de Reynolds, el momento y el mezclado que proporcionan las burbujas ascendentes. El esfuerzo cortante es máxi-

mo en la punta del impulsor y puede estimarse a partir de la ecuación (27-5) [R. Stell y W. D. Maxon, *Biotechnol. Bioeng.*, **4**, 231 (1962)].

$$S_s = S_l\,(D_{is}/D_{il})^{1/3} \qquad (27\text{-}5)$$

donde S_s y S_l son los esfuerzos cortantes en los recipientes más pequeño y grande, respectivamente, y D_{is} y D_{il} representan los diámetros de los impulsores de los recipientes más pequeños y grandes.

Algunas fermentaciones miceliales presentan una esporulación prematura, la ruptura del micelio y bajos rendimientos si el esfuerzo cortante es excesivo. Una velocidad en la punta de 250 a 500 cm/s (8 a 16 ft/s) se considera razonable. Se ha propuesto el tiempo de mezclado como una consideración para el escalamiento, mas poco se puede hacer para mejorarlo en un fermentador grande, porque se requieren motores demasiado grandes para lograr un mezclado rápido.

El número constante de Reynolds no se utiliza para el escalamiento de la fermentación, y es exclusivamente un factor de la aereación. Lo anterior también es válido si se considera el impulsor como una bomba y se intenta su escalamiento por medio de un momento constante. Como el mezclado mecánico tiende a predominar sobre el efecto de las burbujas en el mejoramiento de la aereación, las ecuaciones que incluyen los efectos de las burbujas se emplean poco.

Las productividades de la biomasa en la fermentación varían, por lo general, entre 2 y 5 g/(L·h) [0.12 a 0.31 lb/(ft^3·h)]. Esto representa una demanda de oxígeno del orden de 1.5 a 4 g de O_2/(L·h) [0.093 a 0.25 lb/(ft^3·h)]. En un fermentador de 500 m^3 (18 000 ft^3) lo anterior significa el logro de un coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno del orden de 250 a 400 h^{-1}. Estas capacidades de transferencia de oxígeno sólo se pueden obtener con velocidades de aereación del orden de 0.5 VVM (volumen de aire en STP/volumen de licor o caldo) y con entradas de potencia de agitación mecánica bastante excesivas, que varían entre 2.4 y 3.2 kW/m^3 (1.2 a 1.6 hp/100 gal).

A menudo, la eliminación de calor causa problemas de diseño para el escalamiento. La agitación mecánica junto con el calor metabólico de la biomasa en desarrollo supera la capacidad de enfriamiento de un fermentador grande equipado con una sola chaqueta. En consecuencia, deben utilizarse extensos serpentines de enfriamiento en el interior del fermentador o un sistema de circulación externa, a través de un intercambiador de calor. Por lo general, en fermentaciones altamente viscosas, los serpentines de enfriamiento interno no son deseables, porque causan interferencia con los patrones de mezclado. Existen varios esquemas para la eliminación de calor en los fermentadores grandes, como, por ejemplo, las placas desviadoras de medio serpentín (serpentines de placa) y los tubos de arrastre.

La evaporación del medio proporciona poco enfriamiento. El aire de entrada a los filtros de partícula no debe estar cerca del punto de saturación, porque la condensación de la humedad en el medio filtrante promueve los microorganismos contaminantes y, en consecuencia, las posibilidades de penetración se incrementan considerablemente. En ocasiones se utiliza aire humidificado y el filtro se calienta para prevenir la condensación. Sin embargo, esto es común sólo para el equipo pequeño, en el cual las operaciones adicionales son relativamente sencillas de instalar y mantener.

Una vez que se ha construido la planta, las condiciones de agitación, aereación, transferencia de oxígeno y de calor están más o menos establecidos y se pueden definir los ciclos de esterilización. Las condiciones del medio que se pueden lograr en el equipo de la planta, deben reducirse para el equipo de la planta piloto y el laboratorio (los matraces agitados) con objeto de asegurar que se pueden trasladar los resultados.

Esterilización Algunas fermentaciones antiguas y tradicionales como, por ejemplo, la de alcohol y encurtidos, las realizan organismos que son fuertes y luchan por su causa, al crear condiciones desfavorables para sus competidores. La levadura, por ejemplo, reduce el pH mediante la producción de ácidos a partir de azúcares y su tolerancia al alcohol es otra ventaja poderosa que le permite ejercer su dominio. Aun así, las fábricas modernas utilizan técnicas asépticas o extreman los cuidados para reducir al mínimo la contaminación, que puede ser un riesgo para la calidad del producto al afectar el sabor, la textura, el aroma o la apariencia. Los bioprocesos, como el cultivo de tejidos para producir vacunas, se contaminan muy fácilmente, porque existe una abundancia de nutrientes y no hay protección inherente contra los organismos extraños. Por tanto, existe un intervalo que va desde la buena autoprotección hasta prácticamente ninguna. El valor del producto y la necesidad de un control de calidad determinan el incremento de las medidas de precaución que se deben tomar. La esterilidad, desde el punto de vista práctico, es estadística, porque casi siempre están presentes microorganismos extraños, pero, en general no se propagan con la suficiente rapidez como para dañar una corrida. La buena protección contra la contaminación es relativamente económica, en tanto que la protección absoluta es imposible y los intentos que se hagan para lograrla pueden ser sumamente costosos. La producción de agentes para la guerra biológica requiere cuidados máximos para mantener a los organismos alejados de los trabajadores; sin embargo, el personal que opera los fermentadores muere en raras ocasiones. Las fermentaciones industriales más costosas y mejor protegidas se ven contaminadas a veces. Las técnicas de asepsia y de esterilización para mantener los bioprocesos sin contaminación pueden ser básicas.

Los métodos comunes de esterilización son 1) la eliminación de microorganismos por filtración y 2) matarlos con calor o productos químicos. La esterilización por filtración es una operación unitaria estándar que se trató en la sección 19. Las diferencias para la ingeniería bioquímica son que 1) el medio filtrante y las líneas aguas abajo se tratan con vapor, a una presión a la cual la temperatura mata todos los organismos y esporas; 2) el tamaño de las partículas a eliminar es del orden micrométrico y 3) el medio filtrante debe ser reutilizable y no degradarse por el calentamiento repetido.

Esterilización por filtración El aire se esteriliza casi siempre por filtración. El empleo de calor a pequeña escala ha sido satisfactorio, pero el equipo grande para el calentamiento de la corriente de aire hasta las temperaturas de esterilización no es lo bastante seguro. A pesar de que parece muy sencillo mantener a alta temperatura una sección de la tubería de suministro de aire, se requieren controles automáticos para los ajustes debidos a variaciones en la transferencia de calor, causados por cambios en la velocidad de flujo, y además se necesita una sección de enfriamiento de aire, para prevenir la carga excesiva de calor en el fermentador. Por otra parte, los costos de energía son, en la actualidad, mucho mayores que cuando el calentamiento parecía ser una opción prometedora en relación con la filtración. Para los gases de salida de la fermentación que tienen organismos peligrosos, el calentamiento es una medida de precaución razonable y el costo no es el factor clave.

La esterilización de líquidos por filtración se ha realizado en forma satisfactoria desde la aparición de los filtros de membrana con un diámetro pequeño del poro. Cuando el calor daña los ingredientes, la filtración es una selección ideal. Sin embargo, el equipo y manejo adicional requeridos son una desventaja de la filtración, porque la esterilización con calor es fácil y relativamente económica. El tanque tiene que ser esterilizado con vapor; en consecuencia, conviene llenarlo primero y esterilizar también el contenido. Cuando algunos constituyentes no deben someterse a calentamiento, es costumbre esterilizar el resto del medio con calor y filtrar las soluciones concentradas de los ingredientes delicados.

La magnitud del problema de la esterilización del aire se aprecia en las necesidades usuales de una fermentación altamente aeróbica en la que se utiliza aproximadamente un volumen de aire por volumen de medio por minuto. Para una fábrica con 20 fermentadores de 100 000 L cada uno, se manejan dos millones de L/min (70 000 ft^3/min) de aire. Se utilizan compresoras muy grandes y, por lo menos, se requieren dos, para que una pueda estar en mantenimiento.

En la figura 27-18 se presentan los datos característicos de rendimiento para la eliminación de bacterias de las corrientes de aire mediante filtros de fibra. Para un filtro determinado existe una velocidad intermedia del aire a la que la eficiencia de filtración es mínima, debido a que predominan distintos mecanismos de recolección para los diferentes intervalos de la velocidad del aire. A bajas velocidades son importantes las fuerzas gravitacionales, de difusión y electrostáticas ejercidas sobre las partículas y sus efectos son inversamente propor-

ltivo de tejidos para
, porque existe una
rente contra los or-
ue va desde la buena
alor del producto y
el incremento de las
esterilidad, desde el
i siempre están pre-
l no se propagan con
La buena protección
tica, en tanto que la
ue se hagan para lo-
ción de agentes para
para mantener a los
argo, el personal que
Las fermentaciones
ven contaminadas a
a para mantener los
s.
a eliminación de mi-
lor o productos quí-
ación unitaria están-
as para la ingeniería
neas aguas abajo se
atura mata todos los
las a eliminar es del
ser reutilizable y no

liza casi siempre por
a sido satisfactorio,
orriente de aire hasta
e seguro. A pesar de
ura una sección de la
les automáticos para
ia de calor, causados
necesita una sección
cesiva de calor en el
son, en la actualidad,
recía ser una opción
gases de salida de la
el calentamiento es
es el factor clave.
a realizado en forma
e membrana con un
a los ingredientes, la
equipo y manejo adi-
ión, porque la esteri-
nica. El tanque tiene
onviene llenarlo pri-
algunos constituyen-
tumbre esterilizar el
concentradas de los

del aire se aprecia en
mente aeróbica en la
aire por volumen de
entadores de 100 000
000 ft³/min) de aire.
nos, se requieren dos,

cterísticos de rendi-
orrientes de aire me-
existe una velocidad
ón es mínima, debido
lección para los dife-
velocidades son im-
ión y electrostáticas
nversamente propor-

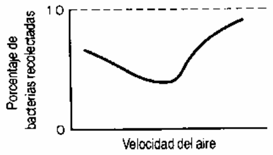


FIG. 27-18 Recolección característica de bacterias mediante un filtro de fibra.

cionales a la velocidad del aire. A velocidades altas, las fuerzas de inercia, que son directamente proporcionales a la velocidad del aire, desempeñan el papel principal. La naturaleza de los efectos de inercia es tal que por debajo de determinada velocidad del aire su efecto sobre la recolección es igual a cero. Si el diseño del filtro se basa en el rendimiento observado a una velocidad de operación distinta a la que ocurre la eficiencia mínima, las sobretensiones o las fallas breves de potencia pueden crear periodos de operación con baja eficiencia. Para la recolección de partículas bacterianas de 1 μm con una gravedad específica de 1.0, contenidas en las corrientes de aire a temperatura y presión del aire ambiente, esta velocidad es igual (en unidades SI) a

$$V_{\text{min, ef}} = 0.02\, d_f \qquad (27\text{-}6)$$

donde la velocidad $V_{\text{min, ef}}$ está en metros por segundo y el diámetro de la fibra, d_f, está en micrómetros.

En la actualidad, existe una tendencia a utilizar los filtros de membrana para la esterilización del aire con objeto de obtener un excelente rendimiento con unidades de tamaño relativamente pequeño. A pesar de que las membranas son bastante eficientes para la filtración del aire y tienden a capturar partículas más grandes que el diámetro del poro, la humedad puede ayudar a que pasen. Para mayor seguridad se recomienda un diámetro del poro de 0.2 a 0.3 μm. Las membranas hidrofílicas no deben utilizarse, porque mantienen humedad estrechamente dentro de los poros y no la desaloja a menos que se produzcan caídas altas de presión a través de la membrana. La humedad tiende a drenarse de las membranas hidrofóbicas y recolectarse en un sumidero. El tamaño del filtro de membrana utilizado para la filtración del aire depende del número de cartuchos necesarios. Sólo el 60% de la caída de presión disponible debe utilizarse en el cálculo para considerar la resistencia incrementada que ofrecen las partículas al recolectarse en la membrana. En la figura 27-19 aparece un filtro con 12 cartuchos de membrana junto con una gráfica de las velocidades características de flujo en función de la caída de presión.

Esterilización del medio Se puede suponer una cinética de primer orden para la destrucción de la materia viva por medio de calor y esto lleva a una relación lineal, donde el logaritmo de la fracción sobreviviente se grafica en función del tiempo. Sin embargo, una cinética no logarítmica de las partículas muertas se encuentra, a menudo, para las esporas de las bacterias. En un modelo de dicho comportamiento se supone una inactivación de las esporas a través de un estado intermedio sensible, representado por el mecanismo

$$C_R \rightarrow C_S \rightarrow C_D \qquad (27\text{-}7)$$

donde C_R, C_S y C_D son las concentraciones de esporas resistentes, sensibles y muertas, respectivamente. Las gráficas características aparecen en la figura 27-20.

En la tabla 27-2 se muestra la resistencia térmica relativa para los diferentes tipos de microorganismos que se encuentran en los medios característicos relacionados con los licores o caldos de fermentación. Las esporas de las bacterias son bastante más resistentes al calor húmedo que cualquier otro tipo de contaminantes microbianos. Por consiguiente, un ciclo de esterilización basado en la destrucción de las esporas de las bacterias debe destruir toda la vida.

Como lo predice la ecuación de Arrhenius (Secc. 4), una gráfica de la velocidad de muerte de los microbios en función del recíproco de la temperatura suele ser lineal y la pendiente es una medida de la suscep-

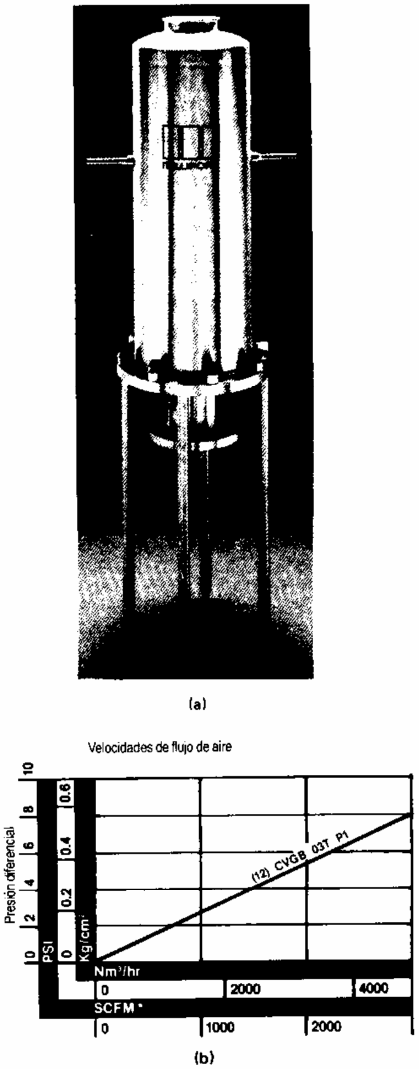


FIG. 27-19 Unidad de 12 cartuchos y datos de presión para un cartucho. *a*) Alojamiento para 12 cartuchos. *b*) Flujo de aire a través del filtro de 12 cartuchos, a 20°C y con descarga a la atmósfera. *Pie cúbico de aire, a 1 atm y 20°C. Los cartuchos contienen 76 cm de longitud y 7.36 cm de diámetro, son de difloruro de polivilideno, con poros de 22 μm. (*Cortesía de Millipore Corp.*)

tibilidad de los microorganismos al calor. Otras correlaciones distintas a la de Arrhenius se utilizan, sobre todo en la industria de procesamiento de alimentos. Una relación de temperatura común para la resistencia térmica es el "tiempo de reducción decimal" (DRT), que se define como el tiempo requerido para reducir la población microbiana en un

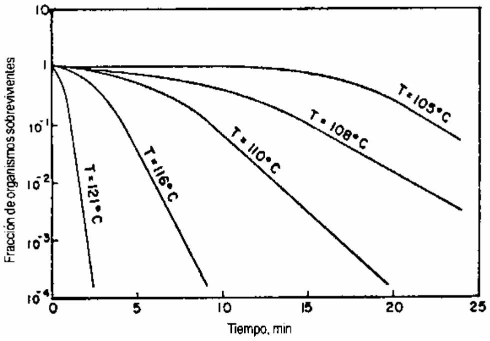


FIG. 27-20 Datos característicos de la mortalidad para las esporas de las bacterias (*B. stearothermophilus*). Para convertir °C a °F multiplíquese por 1.8 y súmese 32. (Wang et. al. *Fermentation and Enzyme Technology*. Wiley-Interscience, New York, 1979, p. 140.)

TABLA 27-2 Resistencia relativa a la muerte con calor húmedo

Microorganismo	Resistencia relativa
Bacterias o levadura vegetal	1.0
Esporas de las bacterias	3 000 000
Esporas de moho	2-10
Virus y bacteriófagos	1-5

décimo. En intervalos cortos de temperatura [por ejemplo, 6°C (10°F)] el DRT es útil, pero su extrapolación a intervalos más amplios de temperatura produce errores graves.

En los caldos o licores de fermentación, la energía de activación (ΔE) relacionada con la muerte de los microbios es mayor que la inactivación térmica producida por los compuestos químicos (véase la tabla 27-3). Por consiguiente, se reduce al mínimo la sobrecocción de los nutrientes debida a la esterilización a altas temperaturas durante periodos cortos (HTST).

TABLA 27-3 Energías de activación para la destrucción térmica

	Energía de activación, cal/mol*
Ácido fólico	16 800
Alcohol d-pantotenílico	21 000
Cianocobalamina	23 100
Hidrocloruro de tiamina	22 000
Bacillus stearothermophilus	67 700
Bacillus subtilus	76 000
Clostridium botulinum	82 000
Putrefacción anaerobia NCE 3679	72 400

* Para convertir calorías por mol a Btu/lb mol, multiplíquese por 1.8.

Esterilización intermitente Si se supone que la presencia de un solo organismo contaminante puede ser la causa de la falla final de la fermentación deseada, es necesario asignar cierta probabilidad de éxito. Por ejemplo, si se puede tolerar una fermentación contaminada en la relación 1:1000, en el cálculo de diseño para el ciclo de esterilización debe utilizarse un valor de 0.001 organismos por fermentación. Sin embargo, en la esterilización por lotes o intermitente, las etapas de calentamiento, retención y enfriamiento del ciclo contribuyen a la reducción de los contaminantes microbianos. Además, la constante de velocidad de mortandad específica varía porque la temperatura del medio cambia. Por consiguiente, en los criterios de diseño, ∇ total está compuesta por

$$\nabla \text{ total} = \nabla \text{ por calentamiento} + \nabla \text{ por retención} + \nabla \text{ por enfriamiento}$$

$$\nabla \text{ por calentamiento} = \ln \frac{N_0}{N_1} = A \int_0^{t_1} \exp(-\Delta E/RT)\, dt \quad (27\text{-}8)$$

$$\nabla \text{ por retención} = \ln \frac{N_1}{N_2} = A \int_0^{t_2} \exp(-\Delta E/RT)\, dt \quad (27\text{-}9)$$

$$\nabla \text{ por enfriamiento} = \ln \frac{N_2}{N} = A \int_0^{t_3} \exp(-\Delta E/RT)\, dt \quad (27\text{-}10)$$

donde ∇ representa la contribución incremental a la mortandad para cada fase de la esterilización, N_0, N_1, etc., son el número de organismos, T es la temperatura absoluta, R es la constante del gas, A es una constante empírica y E es la energía de activación.

Otros parámetros que afectan el perfil de temperatura incluyen: la viscosidad del medio y la cantidad de sólidos en suspensión o materiales insolubles, como, por ejemplo, los aceites vegetales. La velocidad de transferencia de calor depende de los coeficientes de transferencia de calor y los coeficientes de película. El ensuciamiento puede ser importante en la transferencia de calor. El perfil temperatura-tiempo durante la etapa de enfriamiento del ciclo de esterilización incluye los efectos producidos por los serpentines de enfriamiento o la chaqueta del fermentador y el enfriamiento por evaporación, si se inyecta aire estéril para la eliminación de calor. La liberación parcial de la presión da por resultado un enfriamiento por evaporación instantánea. La mayor parte de la esterilización se obtiene de la porción o etapa de retención del ciclo. El ciclo de enfriamiento contribuye poco al proceso general. Debe evitarse un ciclo de calentamiento extremadamente largo, porque su contribución a la destrucción de los microbios es menor que sus efectos perjudiciales.

Esterilización continua La esterilización continua permite tiempos de retención cortos a alta temperatura para evitar la sobrecocción y puede mejorar el rendimiento. Para la esterilización continua se utilizan intercambiadores de calor tubulares o de marco y placa en lugar de la inyección de vapor. A pesar de que el calentamiento es casi instantáneo, la inyección de vapor produce un ruido violento y ofrece pocas oportunidades para el intercambio económico de calor entre las corrientes del proceso.

En la sección o etapa de retención de un esterilizador continuo deben mantenerse la temperatura y el tiempo de exposición correctos. Dada la distribución de los tiempos de residencia, la reducción real de los contaminantes microbianos en la sección de retención es mucho menor que la predicha en la suposición de flujo tipo tapón. La diferencia entre la reducción real de microorganismos y la predicha puede ser de varios órdenes de magnitud; por lo tanto, puede ser incorrecto un diseño basado en las condiciones ideales de flujo.

RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO

La recuperación de los productos puede ser más difícil y costosa que la etapa de fermentación. Por ejemplo, en una planta para la producción de un antibiótico, la inversión en las instalaciones de recuperación fue aproximadamente cuatro veces mayor que la requerida para los recipientes de fermentación y su equipo auxiliar. Casi el 60% de los costos fijos de las plantas de fermentación para la producción de ácidos orgánicos o aminoácidos es para la sección de recuperación. En las fábricas grandes, la mayor parte del equipo

de purificación es el mismo que se utiliza en las industrias de procesos químicos.

Ciertos productos se encuentran contenidos dentro de las células y no se liberan, o sólo se liberan en forma parcial al medio. Puede que sea necesario lavar las células para eliminar las impurezas antes de romperlas para obtener el producto. La ruptura de la célula es una operación unitaria específica de la ingeniería bioquímica; sin embargo, el equipo puede utilizarse en otras industrias. Los molinos de coloides y los dispositivos de esfuerzo cortante como, por ejemplo, el homogenizador Manton-Caulin, que se emplea para la fabricación de pinturas y otros productos, rompe las paredes de muchos tipos de células en forma eficaz. Las células con alta resistencia al esfuerzo cortante se pueden pasar varias veces, pero la generación de calor podría ser un problema. Por lo general, se utiliza energía ultrasónica para la desintegración a pequeña escala de las células, pero es poco práctica para corridas grandes. La molienda con arena o cuentas, el bombeo a alta presión a través de un orificio pequeño, el congelamiento a alta presión a través de un orificio pequeño, el congelamiento y el deshielo, la desecación, la adición de enzimas líticas, la autólisis inducida con algún producto químico como por ejemplo, el cloroformo, y varios métodos para crear esfuerzos cortantes son opciones o medios sinergísticos para romper las células. Se obtienen resultados favorables con los mutantes especiales de las células, que tienen una capacidad superior para formar paredes celulares, a temperaturas ligeramente superiores a las del desarrollo normal. Cuando las células se cambian a la temperatura elevada, la división de la célula daña las paredes y deja que el contenido escurra.

A pesar de que en ocasiones es posible proceder directamente al intercambio iónico, se utiliza la extracción con disolvente u otro procedimiento con todo el licor, para la eliminación de las células biológicas y otros sólidos. La centrifugación se puede tener en cuenta, pero generalmente se utilizan filtros de tambor rotatorio con cordones de descarga. En el pasado se utilizaban grandes cantidades de ayudafiltro, porque muchos licores de fermentación son pegajosos y difíciles de filtrar, pero en la actualidad se emplean agentes poliméricos de puenteo para aglomerar los sólidos; esto permite una buena filtración con pequeñas cantidades de ayudafiltro.

El intercambio iónico o la extracción con disolvente es deseable para la recuperación de los bioprocesos, porque la selectividad es buena, los costos son razonables y es factible a gran escala. Estos y otros pasos de purificación pueden verse afectados por las modificaciones en la fermentación. Por ejemplo, la adición de un exceso de lípidos o aceites antiespumantes puede agravar los problemas de emulsión para la extracción con disolventes o perjudicar el intercambio iónico por el recubrimiento de la resina. La estabilidad de los productos bioquímicos puede ser difícil. El licor o caldo de fermentación de la penicilina se acidifica justo antes de entrar en contacto con el disolvente de extracción (se emplean, por lo general, ésteres, cetonas o hidrocarburos halogenados), porque un pH bajo causa la destrucción rápida de la penicilina en agua. La penicilina se vuelve a extraer hacia la fase acuosa, a un pH que varía entre 7.5 y 8. Se utiliza bicarbonato para amortiguar el pH, porque los agentes agrios son difíciles de controlar. El diseño Podbelniak de una centrífuga (véase la Secc. 21) se utiliza mucho en Estados Unidos para la extracción de licores de fermentación, en tanto que el diseño Westphalia es común en Europa. Puede haber operaciones de cabeza y cola, en las centrífugas, para mejorar los rendimientos porque las emulsiones dan por resultado menos etapas teóricas que las predichas por los fabricantes. La retroextracción en agua no presenta problemas de emulsión y los separadores Delaval dan buenos resultados.

De los varios tipos de etapas de purificación, basados en los procesos de sorción a una fase sólida, el intercambio de iones es el más directo (véase la Secc. 19 para el análisis de las técnicas). La adsorción con carbono tiene gran importancia para la ingeniería bioquímica, básicamente para la eliminación de huellas de impurezas coloreadas. Sin embargo, la adsorción del material deseado en carbono puede ser la menos mala de las técnicas cuando no se puede usar la extracción con disolvente ni el intercambio iónico. A pesar de que la adsorción en carbono no es selectiva y tiene baja capacidad, puede proporcionar una etapa de "aproximación" para iniciar el proceso de purificación.

Los procedimientos de aislamiento para muchos productos bioquímicos se basan en la cromatografía. Prácticamente cualquier sustancia puede ser elegida de una mezcla cruda y extraída, con una pureza relativamente elevada, mediante una columna cromatográfica, con la combinación adecuada de adsorbente, condiciones y reactivos. A pequeña escala o para una planta piloto pequeña, la cromatografía es un procedimiento opcional respecto a técnicas como la electroforesis, que en la actualidad es prácticamente obsoleta. Desafortunadamente, a medida que se incrementa el tamaño, la dispersión en la columna arruina la resolución. Para producir unos cuantos gramos o incluso kilogramos de producto, la cromatografía es una selección excelente. Cuando se resuelva el problema de escalamiento, este procedimiento revolucionará la purificación de los productos bioquímicos y con seguridad encontrará otras aplicaciones en las industrias de procesos químicos. Las perspectivas para el escalamiento son buenas, considerando que recientemente ha sido posible incrementar en un orden de magnitud las cargas de la columna.

La cromatografía por afinidad utiliza ligantes altamente específicos para ciertos compuestos. Existen varios tipos de afinidad que se pueden utilizar: antígeno-anticuerpo, enzima-sustrato, enzima-cofactor o atracciones bioquímicas especiales como, por ejemplo, la avidez de las proteínas por la vitamina biotina. Se han ideado varios procesos de purificación que utilizan la cromatografía por afinidad para aislar productos bastante puros de una mezcla muy cruda. Los agentes de afinidad costosos se regeneran y reutilizan varias veces. En algunos casos, la afinidad es tan fuerte que el adsorbente puede agregarse por lotes. Esto se puede escalar adecuadamente, pero agrega pasos laboriosos para la recolección, elución y regeneración del agente de afinidad.

La cristalización es el método preferido para la obtención del producto final, porque se puede lograr una purificación muy alta. Se pueden producir cristales de antibióticos de gran pureza a partir de soluciones coloreadas bastante impuras si la torta es uniforme y se puede sujetar a un buen lavado, para eliminar el licor madre. Cuando se desea obtener un producto farmacéutico estéril, los cristales se producen a partir de las corrientes de líquido que se han esterilizado por filtración.

MODELADO DEL PROCESO

Por lo general, se supone que las propiedades de gran número de células se pueden considerar como funciones continuas con propiedades promedio, porque ocurren tantas divisiones de las células que las velocidades globales siguen curvas uniformes. Existen excepciones en las que puede inducirse la división de todas las células al mismo tiempo, porque sucesos como los cambios de temperatura o iluminación hacen más lenta o detienen la etapa de división. Las células se pueden obligar a proceder juntas desde ese punto, con números globales que están escalonados con el tiempo, lo que se conoce como "cultivo sincrónico". Las etapas rara vez son distintas para más de unas cuantas generaciones, a menos que el suceso de provocación se continúe aplicando en forma periódica.

Los balances de masa para los cultivos por lotes, comunes y no sincronizados dan

$$dX/dt = \mu X - K_d X \qquad (27\text{-}11)$$

$$dS/dt = -\mu X/Y \qquad (27\text{-}12)$$

$$\mu = f(S) \qquad (27\text{-}13)$$

donde k_d representa el coeficiente de mortalidad, μ, es el coeficiente específico de velocidad de crecimiento, S es la concentración del sustrato y los demás términos se definieron con anterioridad.

Se han propuesto varias relaciones funcionales entre S y μ, pero la ecuación de Monod es la que se utiliza casi en forma exclusiva:

$$\mu = \hat{\mu} S/(K_s + S) \qquad (27\text{-}14)$$

donde $\hat{\mu}$ es el coeficiente específico de la velocidad de crecimiento máximo y K_s es el coeficiente de Monod.

Por lo general, el coeficiente de mortalidad es relativamente pequeño, a menos que se acumulen sustancias inhibidoras; por consiguiente, la ecuación (27-14) muestra un incremento exponencial, hasta que S se agota, para reducir a μ. Esto explica la curva normal de crecimiento (Fig. 27-21), con su fase de retraso, la logarítmica, la de descanso y la de declinación, a medida que el efecto de K_d predomina.

Modelos estructurados Existen varias maneras de agregar detalles significativos a los modelos de cultivos. Las células se pueden compartamentalizar de acuerdo con las funciones bioquímicas, y los componentes pueden interactuar. Por ejemplo, puede haber un grupo de ecuaciones para el metabolismo de los carbohidratos, otro para la síntesis de las proteínas, uno más para la síntesis del ácido nucleico, etc. Esto permite tener una descripción más intrincada de las actividades celulares, pero a expensas de contar con tantas constantes de velocidad que el asignarles valores puede terminar esencialmente como una adivinanza. Para las células con distintos ciclos de vida, el modelo estructurado puede tener compartimientos que correspondan a cada etapa del ciclo. Además, cada compartimiento puede subdividirse en las funciones bioquímicas antes mencionadas. Estos modelos tan complicados han tenido un uso práctico limitado, pero son muy valiosos para dirigir la investigación hacia las áreas donde falta información.

Cultivos continuos Durante varias décadas, los cultivos continuos han sido la meta de los bioingenieros, porque los cultivos intermitentes tienen un tiempo muerto inherente, para limpieza y esterilización, y un prolongado retraso antes de que los organismos entren a un breve periodo de productividad elevada. Las corridas continuas pueden durar muchas semanas, pero debe haber paros para limpieza y mantenimiento. La nutrición y el mezclado del producto pueden manipularse con ventaja en función de la velocidad de dilución. Sin embargo, un problema grave es la inestabilidad del cultivo en sí. El principal éxito de la fermentación continua se ha logrado con cepas resistentes que producen masa celular para la alimentación del ganado o una enzima simple o metabolito. Cuando se utiliza una sola etapa es difícil elevar al máximo el crecimiento de la célula, la producción de producto y la buena utilización de los sustratos. Se han utilizado mohos para las fermentaciones de antibióticos, que son muy sucios y forman recubrimientos voluminosos sobre el eje, los serpentines y cualquier tipo de protuberancia dentro del fermentador. A pesar de que esto puede limitar la longitud de la corrida, un problema más importante es el genético, porque existe una tendencia a retroceder hacia cultivos menos productivos que reemplazan rápidamente los mutantes finamente ajustados, los cuales logran altas concentraciones del producto.

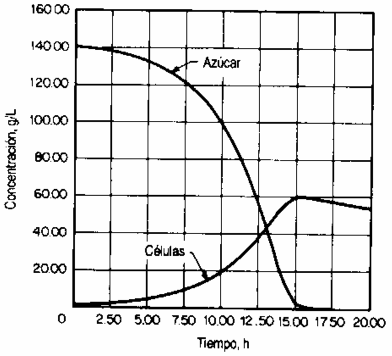


FIG. 27-21 Curva de crecimiento microbiano. $dx/dt = \mu X - K_d X$; $ds/dt = -\mu X/Y$; $\mu = \hat{\mu} S/(K_s + S)$. $\hat{\mu} = 0.35$; $K_d = 0.025$; $K_s = 12.0$; $Y = 0.48$.

En vista de lo limitado de las aplicaciones industriales, el cultivo continuo recibe lo que puede considerarse como una cantidad desproporcionada de atención por parte de los académicos. Como herramienta de investigación, el cultivo por lotes presenta cambios en las concentraciones de productos y reactivos, variaciones de pH y del potencial de oxidación-reducción, y una mezcla complicada de células en desarrollo, que se están muriendo y muertas. Los datos de los cultivos continuos son más fáciles de interpretar, porque se logran regímenes permanentes o existen desviaciones repetidas del régimen permanente. Las explicaciones comunes que se dan para el empleo limitado de los cultivos continuos en la industria son la inestabilidad del cultivo, la dificultad que existe para mantener condiciones asépticas, un conocimiento insuficiente sobre el comportamiento de los microbios y la resistencia para convertir las fábricas existentes. Otra razón más sutil es el costo de cada estación de investigación. Un progreso rápido en la investigación y desarrollo requiere recipientes múltiples para tamizar las diferentes variables; mas por lo general, sólo existen uno o dos fermentadores continuos, porque el costo de las bombas, depósitos, esterilizadores y controles es relativamente elevado.

Los medios convencionales para los cultivos continuos son el quemostat, en el que los nutrientes se alimentan a un reactor, a velocidad constante; y el turbidostat, que utiliza un control de retroalimentación de la velocidad de bombeo para mantener una turbiedad fija en el cultivo. Otra opción con control de retroalimentación del nutriente o de la concentración del producto se conoce con el nombre de "cultivo continuo de concentración acoplada controlada" o "C5". Es deseable un control proporcional de la velocidad de bombeo, porque los cultivos continuos pueden tener respuestas variables inducidas por el encendido y apagado de la bomba de alimentación.

Análisis matemático El concepto del nutriente limitante es esencial para la teoría del cultivo continuo. Existirá un balance estequiométrico exacto de todos los ingredientes que entran a la célula sólo cuando se haga un esfuerzo deliberado, que consume tiempo, para determinar los detalles de nutrición de la célula. Aun así, puede obtenerse un balance diferente si se cambia la velocidad de crecimiento, o si se aplican limitaciones cinéticas en vez de estequiométricas. La menor alimentación de un ingrediente en relación con los demás dará como resultado un crecimiento celular o una síntesis del producto limitados, porque se consumirá primero. Los otros ingredientes pueden ser tóxicos o afectar las actividades celulares, pero no existe una escasez aguda, como es el caso con el nutriente limitante.

Los balances de masa para el recipiente n de una serie de fermentadores continuos son

Velocidad de cambio = velocidad de entrada − velocidad de salida + velocidad de producción

$$V\,dX_n/dt = FX_{n-1} - FX + V\,\mu_n X_n \qquad (27\text{-}15)$$

donde V es el volumen del fermentador, F es la velocidad de alimentación y los otros términos se definieron con anterioridad. El subíndice n se refiere al número del recipiente de fermentación.

Al dividir entre V y sustituir $D = F/V$

$$dX_n/dt = D\,(X_{n-1} - X_n) + \mu_n X_n \qquad (27\text{-}16)$$

y $$V\,dS_n/dt = F\,S_{n-1} - F\,S_n - V\,\mu_n X_n/Y - VMX_n \qquad (27\text{-}17)$$

$$dS_n/dt = D\,(S_{n-1} - S_n) - \mu_n X_n/Y - MX_n \qquad (27\text{-}18)$$

donde M = coeficiente para la energía de mantenimiento (metabolismo sin crecimiento). Para un solo recipiente con alimentación estéril, esto se reduce a

$$dX/dt = \mu X - D X \quad (27\text{-}19)$$

$$dS/dt = D (S_0 - S) - \mu X/Y - M X \quad (27\text{-}20)$$

Este análisis se aplica a cualquier cultivo continuo que cubre las suposiciones de un mezclado perfecto y volumen constante. Las ecuaciones son fundamentales, salvo para la ecuación de Monod [Ec. (27-14)] que no depende del tiempo y debe aplicarse con cuidado a los estados transitorios, en los que puede haber un retraso de tiempo, a medida que μ responde al cambio de S. A régimen permanente, las velocidades de cambio son iguales a cero y $\mu = D$. Al sustituir

$$D = \hat{\mu} S/(K_s + S) \quad (27\text{-}21)$$

$$S = D K_s/(\hat{\mu} - D) \quad (27\text{-}22)$$

donde $\hat{\mu}$ es la constante específica de velocidad de crecimiento máximo. Al despejar X se obtiene

$$X = D Y (S - S_0)/(D + M Y) = Y (S_0 - S) \quad (27\text{-}23)$$

A partir de estas ecuaciones, puede graficarse el comportamiento de X y S en función de la velocidad de dilución (véase la Fig. 27-22). Los aspectos interesantes son que **1)** X tiende a cero y S llega a S_0 cuando D se aproxima a $\hat{\mu}$; **2)** S no es una función de S_0 cuando D es menor que $\hat{\mu}$ y **3)** el coeficiente de mantenimiento es muy importante, pero sólo a bajas velocidades de dilución.

Se ha demostrado que el mezclado es básico a bajas velocidades de dilución, porque la toma del sustrato es extremadamente rápida por las células que se encuentran en condiciones de inanición. En los recipientes pequeños se requiere agitación muy vigorosa, para asegurar la distribución homogénea de la alimentación. Dicha agitación intensa es, probablemente, poco práctica para recipientes grandes, pero quizá sea posible distribuir la alimentación a través de muchas aberturas pequeñas en todo el tanque.

Es fácil proponer ventajas para el cultivo continuo en etapas múltiples, pero es muy difícil realizar toda la investigación y desarrollo de todos los parámetros que deben optimizarse. Cada etapa puede tener su corriente de alimentación, su control de pH y demás condiciones, junto con el reciclaje de las células o fluidos de las otras etapas del proceso. No sólo existen muchos parámetros a analizar para cada etapa sino, además, los cambios en una etapa pueden afectar considerablemente a las otras. Puede ser muy difícil obtener las condiciones y cultivos representativos en una etapa determinada para iniciar las investigaciones, por las complicadas interacciones con demás etapas. Los retrasos de tiempo en las líneas y separadores para reciclaje, además de la complejidad de los regímenes de flujo no ideal, causan análisis teóricos fallidos. Un sistema óptimo de fermentación continua en etapas múltiples con reciclaje y control es una de las proezas más difíciles de la ingeniería. Además, la dinámica de las respuestas de los microbios a las alteraciones no se conoce bien todavía.

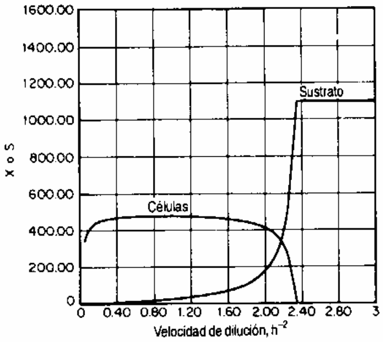


FIG. 27-22 Efectos de la velocidad de dilución en el cultivo continuo; $\hat{\mu}$ = 2.38; S_0 = 1100; Y = 0.45; K_s = 35; E_M = 0.05.

Reciclaje La separación y recirculación de las células da por resultado tiempos de residencia más largos para las células que para el fluido y permite concentraciones relativamente elevadas de las células. En el tratamiento de desperdicios, la alimentación diluida produce velocidades más lentas de crecimiento. En consecuencia, se logra un procesamiento más rápido al obtener mayores poblaciones mediante la recirculación de las células, a pesar de que un porcentaje elevado de ellas pueden estar muertas, porque todas están en estado de inanición. Con la recirculación de las células se logran velocidades altas de producción, que también es importante en las fermentaciones industriales, y existen ventajas adicionales al reutilizar las células, en lugar de desviar los sustratos costosos para producir más células.

En los lodos activados, los organismos no asociados con flóculos no son recolectados y tienden a abandonar el sistema conforme la recirculación incrementa las proporciones de los tipos floculantes. La recirculación de algas de interés comercial en estanques exteriores tiene profunda influencia sobre la población, pero los cambios de temporada pueden desarrollar algas pequeñas no obstante la retención de las algas grandes. Así, en este caso el reciclaje falla conforme las escasas algas grandes mueren o escapan en la recolección.

La recirculación de los fluidos de fermentación tiene objetivos muy diferentes a la recirculación de las células, que procura el control de la población o una mayor productividad. Ya que los licores agotados dejan nutrientes, el reciclaje puede ahorrar costos en los nutrientes y el agua de repuesto, mientras que reduce considerablemente los volúmenes enviados al tratamiento de los desperdicios. Por supuesto, la recirculación total no es deseable porque se incrementa la concentración de los materiales indeseables y se puede envenenar la fermentación. Este incremento determina la cantidad de reciclaje, pero se pueden agregar etapas de purificación para eliminar las sustancias tóxicas. Por ejemplo, el ácido acético es un subproducto de la fermentación del alcohol, pero su baja volatilidad significa que la mayor parte está en el residuo (es decir, los fondos de la destilación del alcohol). Su eliminación por métodos físicos o químicos evita la acumulación en el fermentador debido al reciclaje. De otra manera, se metabolizaría mediante una cepa o especie especial o la mezcla de cultivos.

En la figura 27-23 aparece un diagrama de cultivo continuo con recirculación. Los símbolos de las velocidades de flujo y las concentraciones de los organismos son F y X, respectivamente. Si se supone un mezclado perfecto y condiciones de régimen permanente, para que las derivadas se igualen a cero, los balances de masa dan por resultado

$$\mu = D \left[1 + \omega \left(1 - \frac{1 + \omega}{1 + \omega - \dfrac{F_e}{F}} \right) \right] \quad (27\text{-}24)$$

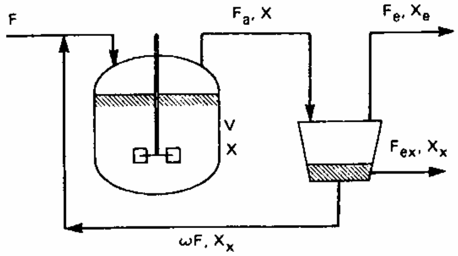


FIG. 27-23 Cultivo continuo con recirculación. (A. E. Humphrey, "Biochemical Engineering", en *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, vol. 4, julio 1977, pp. 359-394.)

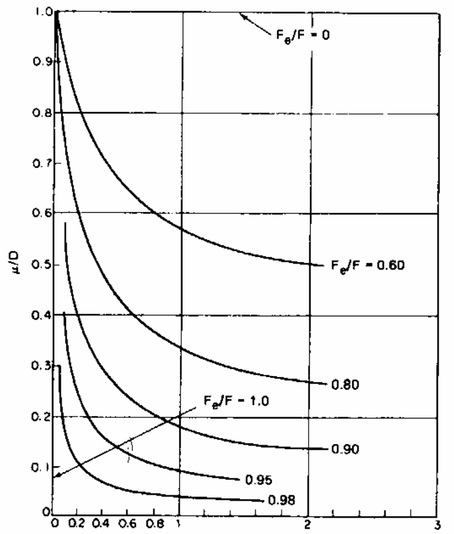


FIG 27-24 Soluciones gráficas a la ecuación de recirculación. (A. E. Humphrey "Biochemical Engineering", en *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, vol. 4, julio 1977, pp. 359-394.)

donde ω es la razón de recirculación, los términos F se muestran en la figura 27-23 y los otros términos se definieron antes.

Sin reciclaje, ocurre lixiviación cuando D es mayor que $\hat{\mu}$, pero la recirculación permite operar con valores de D bastante mayores que $\hat{\mu}$. Un conjunto de curvas, que aparece en la figura 27-24, para varias razones de sobreflujo F_e/F, relacionan μ/D con la razón de recirculación. Las curvas muestran que la concentración de la célula en la corriente de recirculación tiene mayor efecto cuando ω es pequeña, pero el efecto se nivela. Cuando $F_e/F = 0$, no hay recirculación y $\mu = D$.

Cultivos mixtos Las mezclas de microorganismos caracterizan los procesos mostrados en la tabla 27-4. Los procesos para el tratamiento biológico de los desperdicios tienen cultivos electivos y las proporciones de las diferentes especies pueden cambiar mucho en respuesta a cambios en la nutrición o a las condiciones fisiológicas. Existe un área interesante de investigación en determinadas mezclas de microorganismos, pero los resultados tienen poca aplicación práctica. En la tabla 27-5 aparecen las definiciones de las diferentes interacciones. Estas definiciones son difíciles de aplicar a sistemas reales en los que existen interacciones muy complejas entre los organismos, que desempeñan diferentes papeles entre sí.

TABLA 27-4 Procesos de cultivos mixtos

Proceso	Tipos de organismos
Comercial	
Bebidas alcohólicas	Diferentes levaduras, mohos y bacterias
Col agria	*L. Plantarum* con otras bacterias
Encurtidos	*L. Plantarum* con otras bacterias
Quesos	Propionibacterias, mohos y posiblemente muchos otros microorganismos
Ácido láctico	Dos especies de *Lactobacillus*
Beta caroteno	Sexos opuestos de *Blakelea trispora*
Tratamiento de desperdicios	
Filtros de espesamiento	Zoologea, protozoarios, algas y hongos
Sedimento activado	Zoologea, *Sphaerotilus*, levaduras, mohos y protozoarios
Digestión del sedimento	Bacterias celulóticas y formadoras de ácido; bacterias metanogénicas
Lagunas para el drenaje	Muchos tipos de la mayor parte de las familias microbianas

TABLA 27-5 Definición de las interacciones microbianas

Competencia	Competencia por los nutrientes y el espacio
Depradación	Uno se come al otro
Comensalismo	Uno vive del otro, sin ayudarlo ni dañarlo
Mutación	Ambos se benefician
Sinergismo	Combinación con metabolismo cooperativo
Antibiosis	Uno excreta un factor dañino para el otro

Dos tipos de interacciones, la competencia y la depredación, son tan importantes que vale la pena estudiarlas para reducirlas a fórmulas matemáticas. Si se supone que los coeficientes de velocidad de crecimiento específico son diferentes, no se puede alcanzar el estado estacionario en un cultivo bien mezclado y continuo con organismos tipo A y B, porque si uno de ellos estuviera en régimen permanente con $\mu_A = D$, para el otro se tendría que μ_B es desigual a D, con lo que la velocidad de cambio no sería igual a cero. El resultado neto es el crecimiento rápido del tipo que predomina, mientras que el otro declina a cero. En los sistemas reales, incluso en aquellos que se aproximan a los cultivos continuos bien mezclados, puede haber cambios profundos en los números relativos de los diferentes organismos presentes, pero el total predominio de una sola especie es poco común. En los sistemas naturales, la sobrevivencia de gran número de especies es muy ventajosa, porque si se necesita que esté presente un tipo determinado, se agrega un nutriente poco común (¿contaminante?) o se cambian las condiciones.

Los sistemas víctima-predador o de parásitos-huéspedes se pueden analizar a partir de las ecuaciones de balance de masa:

$$dH/dt = \mu_H H - D H \qquad (27\text{-}25)$$

$$dP/dt = \mu_P P - D P \qquad (27\text{-}26)$$

$$dS/dt = D(S_0 - S) - \mu_H H/Y \qquad (27\text{-}27)$$

donde H = concentración de los huéspedes (víctima), P = concentración de los predatorios, S = concentración del sustrato (alimento para las víctimas), S_0 = concentración de la corriente de alimentación, μ_H = función de Monod para S, y μ_P = función de Monod para H.

En la figura 27-25 aparece la simulación por computadora de estas ecuaciones. Los sistemas reales tienen este tipo de comportamiento oscilatorio, pero la frecuencia y las amplitudes son erráticas.

Otra interacción con graves consecuencias es el ataque a las especies que realiza una plaga (virus microbiano) que, por lo general, es altamente específica. La infección de una célula por una plaga virulenta da por resultado una producción que varía entre 10 y varios cientos de nuevas partículas de la plaga, cuyo ácido nucleico toma el control de las actividades celulares. Las células se desintegran y liberan a la plaga, que infecta a las otras células y alcanza rápidamente altas concen-

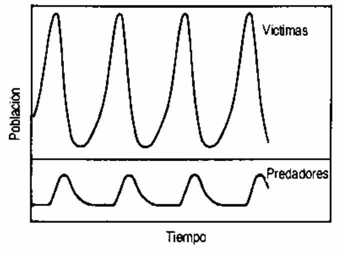


FIG. 27-25 Cinética víctima-predador.

s microbianas
utrientes y el espacio

yudarlo ni dañarlo

bolismo cooperativo
lañino para el otro

icación práctica. En
entes interacciones.
as reales en los que
rganismos, que de-

epredación, son tan
irlas a fórmulas ma-
cidad de crecimien-
el estado estaciona-
anismos tipo A y B,
anente con $\mu_A = D$,
lo que la velocidad
o es el crecimiento
o declina a cero. En
timan a los cultivos
rofundos en los nú-
entes, pero el total
a los sistemas natu-
ies muy ventajosa,
rminado, se agrega
nbian las condicio-

uéspedes se pueden
isa:

(27-25)
(27-26)
(27-27)

a), P = concentra-
ato (alimento para
alimentación, μ_H =
) para H.
nputadora de estas
e comportamiento
erráticas.
ataque a las espe-
por lo general, es
una plaga virulen-
10 y varios cientos
toma el control de
a y liberan a la pla-
ente altas concen-

imas

edadores

traciones. Unas cuantas células de las especies huéspedes pueden ser resistentes a las plagas. Dicha resistencia puede adquirirse a través de la mutación. Estas células tienen pocos competidores y pueden sobrevivir. Sin embargo, también ocurren mutaciones en las plagas y, en consecuencia, ocurren comportamientos muy complicados a medida que los huéspedes sufren mutaciones, al igual que las plagas para contrarrestar la resistencia de los huéspedes.

Por lo general, los grupos de fermentaciones comerciales mantienen diferentes cepas de cultivos adecuados para la producción, de tal manera que los ataques de las plagas puedan frustrarse, al sustituirlos por un cultivo no susceptible. Después de cierto periodo, la plaga se disipa y se puede regresar a la cepa o especie de producción más deseable.

Computadoras e instrumentación Un fermentador es un aparato bastante complicado con controles de temperatura, velocidad de aereación, quizá pH, concentración de oxígeno disuelto o concentración de algunos nutrientes. Existe una tendencia muy acentuada hacia la recopilación y el análisis automatizado de datos. El control analógico todavía es muy común, pero cuando se dispone de una computadora para la recopilación de datos sobre la línea, a menudo es una buena práctica utilizarla también para el control.

Muchos de los problemas de los sensores como, por ejemplo, los que se presentan con los electrodos de pH esterilizados con vapor y las probetas de oxígeno disuelto han sido resueltos, pero aún existe la necesidad urgente de un método para medir en forma rápida y precisa la cantidad de material celular. Los métodos indirectos, por ejemplo, la medición de la proteína producida por las células o el monitoreo de los ácidos nucleicos, son valiosos en ocasiones, pero su proporcionalidad en relación con la masa celular puede variar durante la fermentación. El desarrollo de modelos de computadora que puedan utilizarse para interpretar las variables medidas y calcular la masa celular o la concentración del producto, que puede ser difícil o poco práctica de medir sobre la línea, ha sido un avance importante.

A pesar de que las respuestas dinámicas de los sistemas microbianos no se conocen bien todavía, los modelos con algunas características básicas y algunas empíricas se pueden correlacionar bastante bien con los datos reales. Las fermentaciones reales requieren varios días para terminar la corrida, pero muchas variables pueden probarse en unos cuantos minutos al utilizar la simulación por computadora. La optimización de las fermentaciones por medio de modelos y controles dinámicos de tiempo real aún están en los inicios. Sin embargo, las bases para dicho trabajo avanzan en forma constante. Los fundamentos para todos estos estudios son los balances precisos de materiales.

Los índices comunes del medio físico son la temperatura, la presión, el suministro de potencia al eje, la velocidad del impulsor, el nivel de la espuma, la velocidad de flujo de gas, las velocidades de alimentación del líquido, la viscosidad del licor, la turbiedad, el pH, el potencial de oxidación-reducción, el oxígeno disuelto y la concentración de los gases de salida. Se puede realizar gran variedad de ensayos químicos, pero son importantes el análisis de la concentración del producto, la concentración del nutriente y la concentración del producto precursor. Los índices de respiración se mencionaron antes en relación con la transferencia de oxígeno y son particularmente útiles en el rastreo del comportamiento de la fermentación.

Los métodos de control por computadora se pueden orientar a la alta productividad, la elevada concentración del producto o la reducción al mínimo de los costos. Los sistemas de computadora pueden realizar una optimización sobre la línea de la fermentación. El progreso ha sido lento al utilizar los métodos empíricos, porque existen muchas variables y porque las técnicas estadísticas tienen una posibilidad de reproducción bastante baja para las fermentaciones.

CINÉTICA DE LAS REACCIONES ENZIMÁTICAS

Se considera que las enzimas son excelentes catalizadores por dos motivos: su alta especificidad y sus velocidades de renovación altas. Con algunas excepciones, todas las reacciones de los sistemas biológicos están catalizadas por enzimas y, por lo general, cada enzima cataliza una sola reacción. Para unas cuantas enzimas y otras proteínas, se han determinado las secuencias de aminoácidos y las estructuras tridimensionales. Como rara vez se conoce la estructura molecular de una enzima, no se dispone de un peso molecular preciso para medir la cantidad presente de enzima en gramos mol. En su lugar, casi siempre se expresa la cantidad en términos de su actividad catalítica. Se define la unidad internacional (IU) de enzima como la cantidad capaz de producir un micromol de producto de reacción en un minuto, en condiciones óptimas de reacción (o algunas definidas). La actividad específica es un índice de la pureza de la enzima.

A pesar de que los mecanismos pueden ser complejos y variados, a menudo, mediante algunas ecuaciones sencillas, se puede describir con bastante precisión la cinética de reacción de las reacciones enzimáticas comunes. Se considera que cada molécula de enzima tiene un sitio activo, que en primer lugar debe encontrar el sustrato (el reactivo) para formar un complejo, de tal forma que la enzima pueda funcionar. En consecuencia, se puede expresar el siguiente esquema de la reacción:

$$E + S \underset{2}{\overset{1}{\rightleftharpoons}} ES \overset{3}{\rightarrow} P + E \qquad (27\text{-}28)$$

donde E = enzima, S = sustrato, ES = complejo enzima-sustrato y P = producto. Se puede suponer que las reacciones 1 y 2 están en equilibrio poco después de que la enzima ha sido expuesta a su sustrato. Entonces, la velocidad de formación del producto depende de la concentración del complejo enzima-sustrato de acuerdo con la ecuación

$$k_2[ES] = k_1[E][S] = k_1[S]([E]_T - [ES]) \qquad (27\text{-}29)$$

y

$$V = d[P]/dt = k[ES] \qquad (27\text{-}30)$$

donde $[E]_T = [E] + [ES]$ = concentración del sustrato, $[ES]$ = concentración del complejo enzima-sustrato, $[P]$ = concentración del producto, t = tiempo y k_1, k_2, k_3 representan las constantes cinéticas. Esto da por resultado

$$V = \frac{V_{máx}[S]}{K_M + [S]} \qquad (27\text{-}31)$$

donde $K_M = k_2/k_1$ es la constante de Michaelis. Esta ecuación describe con éxito el comportamiento cinético de un número sorprendentemente grande de reacciones de diferentes enzimas (véase la Fig. 27-26). Al obtener los recíprocos en ambos miembros se obtiene

$$1/V = (K_M/V_{máx})/S + 1/V_{máx} \qquad (27\text{-}32)$$

Una gráfica lineal de $1/V$ en función de $1/S$ (la gráfica Lineweaver-Burk) permite la determinación de K_M y $V_{máx}$, a partir de los datos experimentales.

Esta derivación muestra cómo se maneja, por lo general, la cinética de las reacciones enzimáticas. El comportamiento cinético se complica cuando existen dos especies químicas las cuales pueden formar complejos con las moléculas de enzimas. Una de las especies puede comportarse como un inhibidor de la reacción enzimática y la otra como el sustrato. Dependiendo de la naturaleza de los complejos, los diferentes patrones de inhibición darán por resultado ecuaciones cinéticas distintas. Por ejemplo

$$E + S \rightleftharpoons ES \rightarrow P + S \qquad (27\text{-}33)$$

$$E + I \rightleftharpoons EI \qquad (27\text{-}34)$$

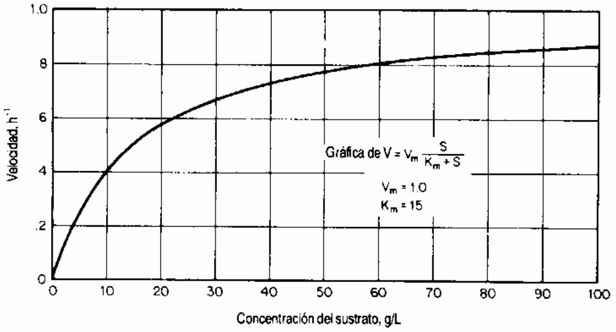


FIG. 27-26 Cinética de Michaelis-Menten. Para convertir gramos por litro a libras por pie cúbico, multiplíquese por 0.0624.

donde I = inhibidor.

Ya que el complejo EI no da por resultado el producto P y considerando que I compite con S por E, esto se conoce como una inhibición competitiva. Por analogía con la ecuación de Michaelis-Menten,

$$\frac{1}{V} = \frac{K_M}{V_{máx}}\frac{1}{S}\left(1 + \frac{[I]}{K_I}\right) + \frac{1}{V_{máx}} \qquad (27\text{-}35)$$

donde I = concentración del inhibidor competitivo y K_I es la constante de inhibición.

Las reacciones enzimáticas también son sensibles a los cambios de pH y de temperatura. En la caracterización de una enzima, el pH y la temperatura óptima son las condiciones en las que la enzima tiene su más elevada actividad catalítica.

Para una exposición más amplia sobre la cinética de las reacciones enzimáticas, consúltense los textos usuales de bioquímica y también, M. Dixon y E. C. Webb, *Enzymes*, 2d ed., Academic, New York, 1964, e I. H. Segal, *Enzyme Kinetics*, Wiley, New York, 1975.

Ingeniería de la inmovilización de la enzima y la enzima inmovilizada Un factor que por lo general impide el desarrollo de las aplicaciones industriales de las enzimas es su costo elevado. La inmovilización es una técnica para retener las moléculas de las enzimas con objeto de volverlas a utilizar. El método para la inmovilización puede ser por adsorción, enlace covalente o entrampamiento. Las membranas semipermeables con forma de láminas planas o fibras huecas son una manera de retener la enzima, ya que permiten el paso de las moléculas más pequeñas. Se han utilizado la gel de poliacrilamida y la de sílice, así como materiales similares, para entrampar biológicamente los materiales activos, incluyendo las enzimas. La encapsulación es otro medio de captura, al recubrir las gotas de líquido que contiene enzimas con algún material semipermeable, formado en el sitio. Hablando en general, el entrampamiento no incluye una reacción química o fisicoquímica directamente con las moléculas de las enzimas, y por consiguiente dichas moléculas no se alteran. La adsorción física en partículas de carbón activado y la adsorción iónica en resinas de intercambio de iones son importantes para la inmovilización de la enzima. Un método con gran número de posibles variaciones es el enlace covalente de la enzima con un portador seleccionado. Materiales como partículas de vidrio, celulosa, sílice, etc., se han utilizado como portadores para la inmovilización. Las enzimas inmovilizadas por entrampamiento y adsorción están sujetas a pérdidas por fugas y desorción, respectivamente. Por otra parte, el tratamiento químico para la formación del enlace covalente entre una enzima y su portador puede dañar en forma permanente algunas moléculas de enzimas. En la inmovilización de la enzima se utilizan a menudo dos términos de eficiencia. El "rendimiento de la inmovilización" se puede utilizar para describir el porcentaje de actividad de la enzima que se ha inmovilizado.

Rendimiento porcentual = 100 × actividad inmovilizada/actividad de iniciación

Por otra parte, la "eficiencia de la inmovilización" describe el porcentaje de actividad de la enzima que es observado:

Eficiencia porcentual = 100 × actividad observada/actividad inmovilizada

Cuando una molécula de enzima se une a un portador, su sitio activo puede bloquearse estéricamente y, por consiguiente, su actividad se vuelve inobservable (inactivada).

Uno de los parámetros más importantes de un complejo portador inmovilizado es la estabilidad de su actividad. La actividad catalítica del complejo disminuye con el tiempo, por las fugas, desorciones, desactivación y similares. A menudo se utiliza la vida media del complejo para describir la estabilidad de actividad. A pesar de que hay muchas excepciones frecuentes, el decaimiento lineal se suele suponer en el tratamiento de la cinética de decaimiento de la actividad de un complejo inmovilizado.

Con frecuencia, la inmovilización por adsorción o por enlace covalente ayuda a estabilizar la configuración molecular de una enzima contra las alteraciones, que incluyen las que pueden causar desactivación térmica. Las enzimas inmovilizadas tienden a ser menos sensibles a cambios de pH que las enzimas libres. La mayor parte de los portadores están diseñados para que tengan una alta porosidad y grandes áreas de superficie interna, con objeto de que cantidades relativamente grandes de enzimas se puedan inmovilizar en un volumen o peso determinado del portador. Por lo tanto, en un complejo portador de enzimas inmovilizadas, las moléculas de enzimas están sujetas al efecto del micromedio en los poros del complejo. Las cargas superficiales y otros efectos del micromedio pueden crear un cambio ascendente o descendente en el pH óptimo de actividad de la enzima.

Un complejo portador-enzima inmovilizada es un caso especial, para el cual se puede utilizar la metodología desarrollada para la evaluación de un sistema catalítico heterogéneo. El complejo de la enzima también tiene efectos de difusión externa, efectos de difusión de poro y un factor de eficacia. Cuando se transportan en solución acuosa, la transferencia de calor es por lo general, buena y es posible suponer que prevalecen las condiciones isotérmicas para el complejo de enzima inmovilizada.

La ecuación de Michaelis-Menten y otras expresiones similares no lineales caracterizan la cinética de las enzimas inmovilizadas. Por consiguiente, para una partícula portadora porosa y esférica, con moléculas de enzimas inmovilizadas en sus superficies tanto interna como externa, el balance de materiales en el sustrato da por resultado lo siguiente:

ÍNDICE

Abrasión, índice de, tabla, 8-12
Absorbedores, 11-26
Absorbedores de película descendente, 14-43
  evaporadores, 11-31
  intercambiadores, 11-25
  inundación, 5-66 a 5-67
  tracción de la superficie, 5-67
  velocidad mínima de mojado, 5-66
Absorción:
  en columnas empacadas, 18-21
  de contaminantes, 26-26 a 26-27
  definición de, 18-3
  diseño económico, 18-48
  optimización, 18-50 a 18-51
  partición, 16-6
  en recipientes agitados, 18-74
  sistemas de refrigeración (*véase* Refrigeración, sistemas de absorción)
  con sorbente sólido, 16-6
  (*véase también* Absorción de gas)
Absorción de gas:
  absorbedores de película descendente, 14-43
  Bunsen, coeficiente de, 14-6 a 14-7
  comparaciones de diseño, 14-28 a 14-29
  datos de equilibrio, 14-6 a 14-7
  datos térmicos, 14-7
  datos de transporte, 14-7
  definición de la, 14-6
  depuradores venturi, 14-43
  diseño económico, 14-32 a 14-34
    altura de la torre, 14-33
    diámetro de la torre, 14-32 a 14-33
    optimización de multicomponentes, 14-33 a 14-34
    presión de operación, 14-32
    relación de líquido a gas, 14-32
    resistencia a la salida de gas, 14-33
    selección del equipo, 14-32
    temperatura del solvente, 14-33
    velocidad del gas, 14-32
  diseño del sistema:
    absorbedor agotador, 14-18 a 14-19
    caída de presión, 14-17 a 14-18
    condiciones de operación del agotador, 14-18
    criterio de la proporción mínima de humedecimiento, 14-17
    datos de equilibrio vapor líquido, 14-16
    datos de solubilidad, 14-16
    descripción del procedimiento, 14-15 a 14-16
    diagramas de diseño, 14-18 a 14-19
    diámetro de la columna, 14-17 a 14-18
    relación de líquido a gas, 14-16 a 14-17
    selección del equipo, 14-17
    selección del solvente, 14-16
  Edmister, fórmula de, 14-31
  efectos del calor, sobre los, 14-26 a 14-29
    consideraciones para el equipo, 14-27
    número de etapas de, 14-27
    presión de operación, 14-27
    relación de líquido a gas, 14-27
    variables de operación, 14-26 a 14-27
  equipo para, 14-6
    procedimientos de diseño, 14-6
  Hatta, número de, 14-35 a 14-40
  Kremser, fórmula de, 14-31
  Kuenen, coeficiente de, 14-6 a 14-7
  método de diseño:
    adiabático, 14-27 a 14-28
    isotérmico, 14-27
    riguroso, 14-28
  por reacción química, 14-34 a 14-41
    desorción, 14-41
    diseño riguroso del absorbedor, 14-39
    de dos gases reactivos, 14-41
    escalamiento, 14-37 a 14-38
    método de diseño, 14-34
    método tradicional de diseño, 14-36
    métodos físicos de diseño, 14-34 a 14-35
    reacciones irreversibles, 14-39
    reacciones reversibles, 14-40
    uso de la bibliografía, 14-41
  sistemas de multicomponentes, 14-29 a 14-30
    diseño del sistema diluido, 14-29 a 14-30
    ecuaciones de agotamiento, 14-31

Ostwald, coeficiente de, 14-7
torres empacadas, datos para, 14-7
torres de platos, datos para, 14-7
Acanalamiento, 16-30
en espuma, 17-69
Accesorios (*véase* Tubería(s), accesorios para)
Acero al carbón, 23-6
Acero inoxidable:
como material de construcción para baja temperatura, 23-62
propiedades del:
colado, 23-42 a 23-47, 23-49 a 23-50
corrosión, 23-36, 23-37
especial, 23-48
forjado, 23-45 a 23-46
Acero, oxidación del, 23-72
Aceros:
y aleaciones, propiedades de los, 23-42 a 23-43
de baja aleación, 23-17
propiedades de los, 23-43 a 23-44
al carbón, 23-6
inoxidables (*véase* Acero inoxidable)
como materiales de construcción, 23-17
resistentes al calor, 23-49
revestidos de vidrio, 23-9
propiedades de corrosión de los, 23-37 a 23-39
Aceros de baja aleación:
como materiales de construcción, 23-17
propiedades de los, 23-44
Aceros inoxidables resistentes al calor, 23-50
Acético ácido:
calor(es):
específico, 3-163, 3-168, 3-170
de evaporación, 3-153
latente, 3-147
de solución, 3-201
conductividad térmica del, 3-298
constantes críticas del, 3-135
datos de corrosión del, 23-18 a 23-20
difusividad en, 3-303
difusividades de pares de gases, 3-301
expansión térmica del, 3-130
relación de calor específico del, 3-173
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-65
propiedades físicas del, 3-28
soluciones acuosas:
calor específico de, 3-174
densidad de, 2-92 a 2-93
presión de vapor de, 3-91
viscosidad del, 3-292 a 3-296
Acetileno:
calor(es):
de combustión, 3-198
específico, 3-169
conductividad térmica del, 3-291
constantes críticas del, 3-135
densidad del, 3-98
Prandtl, número de, 3-291
relación de calor específico del, 3-173
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-281
hasta 1 atm, 3-65
propiedades:
físicas, 3-28
termodinámicas, 3-204
solubilidad en agua del, 3-124
viscosidad del, 3-291, 3-293
Acetona:
calor(es):
específico, 3-163, 3-168, 3-170
de evaporación, 3-153
latente, 3-147
compresibilidad de la, 3-143
conductividad térmica de la, 3-291, 3-297
constantes críticas de la, 3-135
difusividades de pares de gases, 3-310
expansión térmica de la, 3-130
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor de la:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-65
propiedades físicas de la, 3-28
soluciones acuosas, densidad de las, 3-116
viscosidad de la, 3-291, 3-293 a 3-296
Ácido bórico, datos de corrosión, 23-18 a 23-20
Ácido bromhídrico:
calor:
capacidad de, 3-157
específico, 3-161
de formación, 3-183
latente, 3-144
constantes críticas, 3-135
energía libre, 3-183
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-62
propiedades físicas del, 3-15
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-121
solución acuosa:
densidad de la, 3-101
presión parcial de la, 3-90
viscosidad del, 3-292
Ácido clorhídrico:
calor:
capacidad de, 3-158
específico, 3-168 a 3-169
de formación, 3-183
latente, 3-144
constantes críticas, 3-135
datos de corrosión del, 23-18 a 23-20
diagrama de concentración entalpía, 3-237
difusividad en, 3-304
energía libre, 3-183
expansión térmica, 3-130
gaseoso, densidad del, 3-98
presión de vapor del, arriba de 1 atm, 3-59
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-62
presión parcial del, en HCl acuoso, 3-84
propiedades físicas del, 3-16
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en a
soluciones acuo
calor especíſ
viscosidad del,
Ácido fluorhídric
calor:
específico, 3
de formació
latente, 3-14
constantes críti
datos de corrosi
energía libre, 3-
gaseoso, densid
en solución
presión de vapo
propiedades fís
Ácido fosfórico, d
Ácido nítrico:
calor latente, 3-
datos de corrosi
propiedades fís
propiedades te
solución acuos
calor especí
densidad de
presión parc
Ácido oxálico, da
Ácido sulfhídrico
Ácido sulfúrico:
conductividad
expansión térm
propiedades fís
propiedades te
solución acuos
calor:
de form
específi
latente,
calor espec
datos de co
densidad de
difusividad
energía libr
presión par
viscosidad del,
Ácido sulfuroso,
Acoplamientos fl
Acoplamientos m
de desconexió
flexibles, 24-5
Acrilonitrilo, 20-
Actuadores:
de posición lin
eléctricos,
electroneu
hidráulicos,
mecánicos,
neumáticos
(*véase tambié*
Adam, método m
Adsorbentes:

solubilidad en agua, 3-121, 3-126
soluciones acuosas, densidad de las, 3-101
calor específico de las, 3-174
viscosidad del, 3-292 a 3-296
Ácido fluorhídrico:
calor:
específico, 3-169
de formación, 3-183
latente, 3-144
constantes críticas, 3-135
datos de corrosión, 23-18 a 23-20
energía libre, 3-183
gaseoso, densidad del, 3-98
en solución acuosa, 3-101
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-62
propiedades físicas del, 3-16
Ácido fosfórico, datos de corrosión, 23-21 a 23-23
Ácido nítrico:
calor latente, 3-144
datos de corrosión del, 23-21 a 23-23
propiedades físicas del, 3-19
propiedades termodinámicas del, 3-278
solución acuosa:
calor específico, 3-174
densidad de la, 3-102 a 3-103
presión parcial de la, 3-90
Ácido oxálico, datos de corrosión del, 23-21 a 23-23
Ácido sulfhídrico, densidad del, 3-98
Ácido sulfúrico:
conductividad térmica, 3-297
expansión térmica, 3-130
propiedades físicas del, 3-25
propiedades termodinámicas del, 3-278
solución acuosa:
calor:
de formación, 3-183
específico, 3-168
latente, 3-144
calor específico, 3-174
datos de corrosión, 23-21 a 23-23
densidad de la, 3-107 a 3-108
difusividad en, 3-304
energía libre, 3-183
presión parcial de la, 3-85 a 3-89
viscosidad del, 3-295 a 3-296
Ácido sulfuroso, datos de corrosión, 23-21 a 23-23
Acoplamientos flexibles, 6-100 a 6-101
Acoplamientos mecánicos, 24-53 a 24-54
de desconexión, 24-54
flexibles, 24-54
Acrilonitrilo, 20-80
Actuadores:
de posición lineal, 22-91 a 22-94
eléctricos, 22-91
electroneumáticos, 22-92 a 22-94
hidráulicos, 22-94
mecánicos, 22-94
neumáticos, 22-91
(*véase también* Elevadores, Posicionadores, Transductores)
Adam, método modificado de, 2-71
Adsorbentes:
equilibrio, 16-13
propiedades físicas de los, 16-9 a 16-10
(*véase también* Sorbentes)
Adsorción, 16-5 a 16-52, 17-67
adiabática, 16-43 a 16-44
de contaminantes, 26-25 a 26-28
curva discontinua de, 16-18 a 16-44
equilibrio de, 16-10 a 16-18
en fase gaseosa, uso de la, 16-6
en fase líquida, usos de la, 16-5 a 16-6
física, definición de la, 16-5
intercambio en, 16-14
entre componentes líquidos, 16-14
isotermas, 16-12 a 16-14
de Freundlich, 16-13 a 16-14
de Langmuir, 16-13 a 16-14, 16-16
lechos de, en movimiento, 16-51 a 16-52
multicomponente, 16-47 a 16-52
métodos de diseño, separaciones de lecho fijo, 16-6 a 16-9
en sistemas con variación múltiple, 16-17 a 16-18
operaciones cíclicas en, 16-38 a 16-39
propiedades y materiales de la, 16-10 a 16-11
quimisorción, definición de la, 16-5
transferencia de masa en la (*véase* Transferencia de masa en absorción)
usos de la:
en fase gaseosa, 16-6
en fase líquida, 16-5 a 16-6
variables:
sistema, 16-12
transición, 16-12
variancia (grados de libertad), 16-12
(*véase también* Sorción)
velocidades de, 16-23
Adsorción adiabática, 16-43 a 16-44
curvas discontinuas de la, 16-45
Adsorción, sistemas de, 26-22
en columnas empacadas y de platos, 26-21
Aerosoles, 20-102
nieblas, 18-78
Agitación:
por aire, 19-15
asentamiento libre, velocidad de, 19-14
profundidad de vórtice, 19-10
(*véanse también* Agitadores; Mezclado); Mezclador(es)
asentamiento posterior, 19-14
cabeza del fluido durante, 19-10
comportamiento del fluido, 19-9 a 19-11
consumo de potencia, 19-11 a 19-13
fluidos no newtonianos, 19-11
costos de, 19-15
para cristalización, 19-38 a 19-42
dispersión de gas como un medio de, 18-61 a 18-62
(*véase también* Dispersión)
equipo para, 19-9
agitadores con claros pequeños, 19-8
American Institute of Chemical Engineers, 19-15
diseño del, 19-11 a 19-13
diseño óptimo del, 19-15
impulsores, 19-5 a 19-7
procedimientos de prueba, 19-15

selección del, 19-11
en tanques con placas desviadoras, 19-8 a 19-9
en tanques sin placas desviadoras, 19-8
impulsores:
flujo axial, 19-7
flujo radial, 19-7 a 19-9
laminar, 19-10
para lixiviación, 19-53 a 19-56
mezcladores de chorro, 19-11 a 19-12
mezclas, uniformidad de, 19-13
reducción del tamaño de partícula, 19-15
para sorción, 19-51
suspensión de sólidos, 19-13 a 19-15
de suspensiones de partículas de baja viscosidad, 19-6 a 19-16
altura de, 19-14 a 19-15
grado de, 19-13 a 19-15
intermitente, 19-14
muestreo, 19-14
número de potencia, 19-11
tanque con alimentación continua, 19-14
turbulenta, 19-9 a 19-10
velocidad de asentamiento libre, 19-14
velocidad de descarga, 19-10 a 19-11
velocidad de rotación, 19-13
Agitadores, 19-6 a 19-13
amasadores de brazo doble, 19-17 a 19-19
de ancla, 19-8
de aspa helicoidal, 19-18
de barra cizalladora, 19-17 a 19-18
de compuerta, 19-17
diseño de, 19-11 a 19-12
diseño óptimo de, 19-15
para dispersión gas-líquido, 18-71
mecánicos, 19-13
mezcladores de chorro, 19-12 a 19-13
de paletas, 19-7
presión del fluido de, 19-10
de propulsor, 19-6 a 19-9
con tanque estacionario, 19-17 a 19-18
tipo recipiente intercambiable, 19-17
de turbina, 19-7 a 19-11
(*véanse también* Agitación; Mezclado); Mezclador(es)
velocidad de descarga de, 19-9 a 19-11
velocidades del fluido, 19-9
Agitadores rotatorios, sello de los, 6-36
Aglomeración, 21-4
esférica, 17-64, 21-57 a 21-59
sónica, 18-92 a 18-93
Aglomerador de tambor, 8-76 a 8-77
Aglomeradores por volteo, 8-76
Aglomerados, consistencia de, 8-75
Agotamiento:
definición del, 18-3
de gases:
condiciones de operación, 14-18
sistemas de absorbedor-agotador, 14-18 a 14-19
Agricultura con fertilizantes de desperdicios sólidos, 26-80 a 26-81
Agua:
calor:
capacidad de, 3-158
específico, 3-168 a 3-169
de evaporación, 3-153
de formación, 3-183
latente, 3-144
compresibilidad del, 3-141 a 3-143
conductividad térmica, 3-297 a 3-298
conservación del, 26-51
constantes críticas, 31-36
contenido de vapor de:
en aire, 3-94
en gases, 3-94 a 3-95
de la mezcla, N_2-H_2, 3-94 a 3-95
densidad del, 3-95 a 3-96
difusividad en, 3-304
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-183
estimaciones de costo de los sistemas de, 25-81
expansión térmica, 3-130
presión parcial:
en ácido clorhídrico acuoso, 3-84
en ácido sulfúrico, 3-86
en CH_3OH, 3-93
en HBr, 3-90
en HNO_3, acuoso, 3-90
en NaOH, 3-93
en Na_2CO_3, 3-93
en NH_3, 3-91 a 3-92
en SO_2, acuoso, 3-84
presiones de vapor del, 3-57
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-62
propiedades del óxido de deuterio, 3-230
propiedades físicas del, 3-26
propiedades termodinámicas del, 3-280
vapor de, propiedades termodinámicas del, 3-281 a 3-288
viscosidad del, 3-293 a 3-296
Aire:
calor específico, 3-169
coeficiente de Joule-Thomson, 3-132
conductividad térmica del, 3-298
constantes críticas, 3-135
contenido de vapor de agua, 3-94
densidad del, 3-98
entalpía para:
gas ideal, 3-212
presión, diagrama de, 3-213
temperatura, diagrama de, 3-212
factor de compresibilidad, 3-136
funciones psi, 3-210
Prandtl, número de, 3-298
en procesos a baja temperatura, 12-51
relación de calor específico, 3-173
propiedades del:
atmosférico, 3-211
termodinámicas, saturado, 3-205
termofísicas, 3-206 a 3-209
propiedades termodinámicas del, tabla, 12-7 a 12-10
solubilidad en agua, 3-124
viscosidad del, 3-293
Aislamiento, 11-54 a 11-60
acabados para el, 11-60
autoignición del, 11-61
conductividad
criogénico, 12-
capas múlti
característic
espuma, 12
polvo evacu
al vacío, 12
criogénico al al
espesor del aisl
espesor económ
materiales para
prácticas de ins
resistencia al fu
en tanques, 11-
en tuberías, 11-
Aislamiento crioq
Alambre, calibre
Alcohol butílico:
calor:
latente, 3-1
específico,
de evaporac
constantes crít
diagrama temp
difusividad en
presión de vap
arriba de 1
hasta 1 atm
propiedades fí
viscosidad del
Alcohol metílico
calor:
latente, 3-1
específico,
de evapora
compresibilid
conductividad
constantes crít
difusividad en
difusividades
expansión tér
presión de vap
propiedades fí
propiedades te
razón de calor
solución acuo
calor espec
densidad d
presiones p
viscosidad del
Alcohol propílic
calor:
específico,
de evapora
latente, 3-1
compresibilid
conductividad
constantes crí
difusividad en
difusividades
presión de vap

conductividad térmica del, 11-54
criogénico, 12-61 a 12-62
capas múltiples, 12-62
características del, tabla, 12-61
espuma, 12-63
polvo evacuado, 12-62
al vacío, 12-61
criogénico al alto vacío, 11-60 a 11-61
espesor del aislamiento para tuberías, tabla, 11-60
espesor económico del, 11-62 a 11-65
materiales para, 11-59
prácticas de instalación, 11-65 a 11-66
resistencia al fuego del, 11-61 a 11-62
en tanques, 11-66
en tuberías, 11-65
Aislamiento criogénico, 12-61 a 12-63
Alambre, calibres de, 1-30
Alcohol butílico:
calor:
latente, 3-147
específico, 3-163 a 3-164
de evaporación, 3-151
constantes críticas, 3-135
diagrama temperatura-entropía, 3-223
difusividad en, 3-303
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-67
propiedades físicas, 3-32
viscosidad del, 3-295 a 3-296
Alcohol metílico:
calor:
latente, 3-148
específico, 3-166 a 3-167
de evaporación, 3-152 a 3-153
compresibilidad del, 3-143
conductividad térmica, 3-297
constantes críticas, 3-135
difusividad en, 3-304
difusividades en pares de gases, 3-301
expansión térmica, 3-230
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-75
propiedades físicas del, 3-44
propiedades termodinámicas del, 3-248 a 3-249
razón de calor específico, 3-173
solución acuosa:
calor específico de la, 3-176
densidad de, 3-110
presiones parciales de, 3-93
viscosidad del, 3-292 a 3-296
Alcohol propílico:
calor:
específico, 3-168, 3-171
de evaporación, 3-151 a 152
latente, 3-148
compresibilidad del, 3-143
conductividad térmica, 3-297
constantes críticas, 3-135 a 3-136
difusividad en, 3-304
difusividades en pares de gases, 3-301
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-83
hasta 1 atm, 3-78
solución acuosa:
calor específico, 3-176
densidad de la, 3-113 a 3-114
viscosidad del, 3-292 a 3-296
Alcohol etílico:
calor:
específico, 3-165, 3-171
de evaporación, 3-151 a 3-152
latente, 3-148
compresibilidad del, 3-143
conductividad térmica del, 3-297
diagrama de entalpía-concentración para el, 3-233
difusividades en pares de gases, 3-301
expansión térmica del, 3-130
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-83
hasta 1 atm, 3-72
propiedades físicas del, 3-39
relación de calor específico, 3-173
solución acuosa, densidad de la, 3-111 a 3-113
calor específico de la, 3-176
viscosidad del, 3-292 a 3-296
Aleaciones:
de alta temperatura, como material de construcción, 23-71
de hierro colado, 23-17
(*véase también* Metales y aleaciones)
Aleaciones de aluminio:
baja temperatura, como material de construcción, 23-62
propiedades de, 23-49
Aleaciones medias como material de construcción, 23-43
Aleaciones de plomo como material de construcción, 23-47
Aleaciones, temperaturas de fusión de, 23-44
Alfabeto griego, 1-28
Algas, 27-3
Álgebra, 2-15 a 2-19
teorema fundamental del, 2-17
Algoritmo de la matriz de tres diagonales, 13-48 a 13-50
Almacenamiento:
de desperdicios sólidos, 26-59 a 26-60
de gases, 6-115 a 6-116
a baja temperatura, 6-116
costo del, 6-116
criogénicos, 6-116
en líneas de tubería, 6-116
materiales del recipiente, 6-116
recipientes para gases, 6-116
en recipientes a presión, 6-116
de líquidos, 6-111 a 6-115
aislamiento del recipiente, 6-115
apoyos para tanques de, 6-115
materiales para el, 6-114
piletas, 6-115
seguridad en el, 6-114
subterráneo, 6-115
tanques atmosféricos, 6-111 a 6-113
tanques a presión, 6-113
volumen del tanque, cálculo del, 6-113
de paquetes, 7-59
(*véase también* Embalajes)

de sólidos, 7-22 a 7-42
alimentadores:
de banda, 7-34
de estrella, 7-34
de mandil, 7-34
de tornillo, 7-33
vibratorios, 7-34
arreglos de descarga, 7-22, 7-28
características de flujo del material, 7-29 a 7-32
criterios de diseño, 7-30
dispositivos para ayuda de flujo, tolvas vibratorias, 7-33
recuperación, 7-28 a 7-29
Almacenamiento subterráneo de líquidos, 6-115
Altura equivalente a una placa teórica (HETP), 13-103 a 13-104
en absorción de gas, 14-11
Altura de las unidades de transferencia (HTU), 14-11
en absorción, 16-8
en absorción de gas, 14-11
en columnas empacadas, 18-39
en intercambio iónico, 16-8
Alúmina, 20-41
adsorbente, 16-9
ladrillo de, como material para alta temperatura, 23-67
Aluminio, cloruro de, datos de corrosión, 23-21 a 23-23
Amagat, ley de, 3-320
Amasadores para la transferencia de calor de sólidos, 11-54
American Institute of Chemical Engineers (AICHE), 19-15
American National Standards Institute (ANSI), 6-39
American Society of Mechanical Engineers (ASME), 6-120 a 6-125
American Society for Testing and Materials (ASTM), 6-39
pruebas de destilación, 13-76 a 13-79
American Standard Definitions of Electrical Terms (ASDET), 22-60
American Petroleum Institute (*véase* API)
Amoniaco:
calor(es):
capacidad de, 3-159
específico, 3-168, 3-169
de evaporación, 3-153
de formación, 3-187
conductividad térmica, 3-291, 3-296, 3-299
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
energía libre, 3-187
Prandtl, número de, 3-291 a 3-300
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-60
propiedades del:
físicas, 3-8
termodinámicas, 3-214 a 3-215
razón de calor específico, 3-173
sistema aire-agua, 18-40
solubilidad en agua, 3-124
solución acuosa:
calor específico de, 3-174
densidad de, 3-99
presiones parciales de, 3-91 a 3-93
viscosidad del, 3-291, 3-293
Amoniaco acuoso, datos de corrosión, 23-21 a 23-23
Amonio, carbonato de, datos de corrosión, 23-24 a 23-26
Amonio, cloruro de, datos de corrosión, 23-24 a 23-26

Amortiguamiento de la pulsación, 5-68
Amplitud, definición de, 21-88
Análisis, conductométrico, 22-53
Análisis coulombimétrico, 22-54
Análisis dimensional, 2-120 a 2-123
Buckingham, método pi de, 2-121 a 2-123
Rayleigh, método de, 2-120 a 2-121
Análisis de los modelos para dinámica de fluidos, 5-69 a 5-70
Análisis numérico, 2-62 a 2-78
Análisis oscilométrico, 22-54
Análisis de sensitividad, 25-19 a 25-22
Analizadores:
composición química:
cromatografía, 22-52
infrarroja, 22-53
nefelometría, 22-53
paramagnetismo, 22-53
radiación ultravioleta y visible, 22-53
turbidimetría, 22-53
sistema de muestreo (*véase* Analizadores del proceso, sistemas de muestreo)
Analizadores del proceso, 22-56 a 22-60
sistemas de muestreo, 22-56
acondicionamiento de la muestra, 22-58
muestra de calibración, 22-58
muestreo de varias corrientes, 22-58
punto de muestreo, 22-58
punto de retorno de la muestra, 22-58
toma de la muestra del proceso, 22-56
transporte de la muestra, 22-57
Anaquel giratorio para transferencia de calor, 11-50
Anclas de mezclado, 19-8
Anemómetros, 5-11 a 5-12
de alambre caliente, 5-12
laser-Doppler, 5-12
de paleta, 5-11 a 5-12
de película caliente, 5-12
de termistor, 5-12
de termopares calentados, 5-12
Anhídrido acético, datos de corrosión del, 23-18 a 23-20
Anhídrido ftálico, 20-80
Anilina, datos de corrosión, 23-24 a 23-26
Anillos de apoyo, 6-104
Anillos de carbón, 21-80
Anillos de cerámica, 21-80
Anillos Raschig, 18-22, 18-25 a 18-27, 18-29, 18-31, 18-33 a 18-37, 18-40, 18-86
costo de los, 18-47
HTU, 18-37
API (American Petroleum Institute):
conversión de grados, 1-19
gravedad, definición de la, 13-77
Apoyos de la tubería, 6-101
Aproximaciones numéricas, 2-61
de integrales, 2-35
sumas y, 2-61
Árboles de decisión, 25-30
Arcilla, 20-42
Área interfacial, 21-65
Argón:
calor(es):

capacidad de
latente, 3-14
compresibilidad
conductividad t
constantes críti
densidad del, 3-
difusividades d
Joule-Thomson
Prandtl, númer
presión de vapo
propiedades del
físicas, 3-10
termodinám
relación de calo
viscosidad del,
Argón-nitrógeno-
Arquímedes, espi
Arrancadores para
Arrastre, 18-52 a
de burbujas, 18
colectores, 18-
correlación par
debido al burbu
distribución de
efecto de la vel
carga del líq
como fuente de
inundación por
en lechos fluidi
de películas líq
platos planc
superficies
pérdidas por, 1
rearrastre, 18-
de polvo, 2
rearrastre de p
separación por
tamaño de la g
en torres de pl
Arrhenius, ecuac
Arrhenius, parám
tabla, 4-51
Asentadores para
auxiliares, 21-
centrífugos, 2
de ciclón, 21-7
por gravedad,
Asfalto como ma
Asíntotas, 2-20
Aspa(s):
giratorias, 5-5
de guía a la ent
ASTM (America
Ataque a alta tem
propiedades fí
propiedades m
resistencia a la
Atmósfera, propi
Atomización (*vé*
Atomizadores, 1
efecto de:

capacidad de, 3-155
latente, 3-144
compresibilidad del, 3-139
conductividad térmica, 3-291, 3-298
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividades de pares de gases, 3-301
Joule-Thomson, coeficiente de, 3-132
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del, hasta 1 atm, 4-42
propiedades del:
físicas, 3-10
termodinámicas, 3-216
relación de calor específico, 3-173
viscosidad del, 3-291, 3-293
Argón-nitrógeno-oxígeno, equilibrio líquido vapor, 3-217
Arquímedes, espiral de, 2-23
Arrancadores para motores eléctricos, 24-10 a 24-13, 24-15
Arrastre, 18-52 a 18-60, 20-71
de burbujas, 18-64
colectores, 18-90
correlación para lechos fluidizados, 20-72
debido al burbujeo de gas, 18-58
distribución del tamaño de las gotas, gráfica, 18-59
efecto de la velocidad del gas sobre el, gráfica, 18-85
carga del líquido en el, gráfica, 18-85
como fuente de nucleación, 18-62
inundación por, 18-5 a 18-6
en lechos fluidizados, 20-71 a 20-72
de películas líquidas, 5-65 a 5-66
platos planos, 5-65
superficies cilíndricas, 5-66
pérdidas por, 11-40
rearrastre, 18-84 a 18-86, 18-89
de polvo, 20-133
rearrastre de polvo, 20-133
separación por (*véase* Separadores por arrastre)
tamaño de la gota, 18-58
en torres de platos, 18-14 a 18-15
Arrhenius, ecuación de, 4-3
Arrhenius, parámetros de, 4-22
tabla, 4-51
Asentadores para dispersiones de líquidos, 21-70
auxiliares, 21-70
centrífugos, 21-71
de ciclón, 21-71
por gravedad, 21-70
Asfalto como material de construcción, 23-55
Asíntotas, 2-20
Aspa(s):
giratorias, 5-56
de guía a la entrada del compresor, 6-25
ASTM (American Society for Testing and Materials), 13-77
Ataque a alta temperatura, 23-8
propiedades físicas, 23-8
propiedades mecánicas, 23-8
resistencia a la corrosión, 23-8
Atmósfera, propiedades termodinámicas de la, 3-211
Atomización (*véanse* Gotas; Toberas de rocío)
Atomizadores, 18-54, 18-55, 18-57
efecto de:
ángulo del rocío, 18-57
caída de presión, 18-57
diámetro del orificio, 18-57
velocidad de flujo, 18-57
rotatorios, 18-54, 18-55, 18-57
Sauter, diámetro medio de, 18-56, 18-58
tipos de, tabla, 18-55
Atomizadores rotatorios, 18-54 a 18-55, 18-57
Aumento de tamaño, 8-69 a 8-82
aglomeración por volteo, 8-75 a 8-78
aglomerador de tambor, 8-76 a 8-77
aglomeradores de mezclador, 8-77
aglomeradores de volteo, 8-75 a 8-76
crecimiento del aglomerado, 8-75
compactación por presión, 8-71 a 8-75
aglutinantes y lubricantes, 8-71
equipo para la, 8-72 a 8-75
transmisión de fuerzas, 8-71
esferoidización del material, requerimientos de humedad para la, 8-75
métodos y aplicaciones del, tabla, 8-70
granulación, 8-81
rociamiento, 8-80 a 8-81
secado por rocío, 8-79
métodos de prueba de resistencia, 8-70 a 8-71
pruebas de abrasión, 8-71
pruebas de caída, 8-71
pruebas de compresión, 8-70
pruebas de desintegración de la tableta, 8-71
pruebas de torta, 8-71
métodos de rocío, 8-79 a 8-81
procesos térmicos, 8-78 a 8-79
equipo de transferencia de calor, 8-79
secado y solidificación, 8-79
sinterización y endurecimiento por calor, 8-78 a 8-79
resistencia del aglomerado, 8-69 a 8-71
cálculo de la, 8-69
mecanismos de unión, 8-69
secado instantáneo, 8-81
sistemas líquidos, 8-81 a 8-82
floculación de gránulo, 8-82
mojado con líquido no miscible, 8-81 a 8-82
proceso sol-gel, 8-82
Ayudafiltros, 19-81
perlita, 19-81
sílico de diatomáceas, 19-81
Azeótropos, 13-62 a 13-76
binarios:
heterogéneos, 13-62, 13-69
homogéneos, 13-62, 13-69
clasificación de, 13-63 a 13-67
ebullición:
máxima, 13-64
mínima, 13-63
multicomponentes, 13-62, 13-66, 13-69 a 13-73
Azufre:
calor específico del, 3-169
en carbón, 9-5
Azufre, dióxido de:
calor:
capacidad de, 3-161

específico, 3-168 a 3-169
de evaporación, 3-164
de formación, 3-189
latente, 3-146
conductividad térmica, 3-291, 3-297
constantes críticas, 3-136
densidad del, 3-99
difusividad en, 3-304
energía libre, 8-161
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-63
presiones parciales de SO_2 en soluciones acuosas de, 3-86
propiedades termodinámicas del, 3-277
relación de calor específico, 3-173
remoción del, en lecho fluidizado, 9-51
sistema aire-agua, 18-42 a 18-43
solubilidad en agua, 3-122 a 3-126
viscosidad de, 3-291, 3-293 a 3-296
Azufre, hexafluoruro de, propiedades termodinámicas del, 3-289

Bacterias, 27-3
Balance de, 25-42 a 25-45
Balance de fondos, 25-55 a 25-58
Balance de momento en dinámica de fluidos, 5-23 a 5-26
Balances de materia y energía en sistemas reaccionantes, 4-30 a 4-33
Bario, sulfuro de, 20-41
Barómetros, 5-7
de mercurio, 5-7
Bartlett, prueba de, para variancias iguales, 2-106
Bastidor de almacenamiento (*véase* Embalaje.operaciones de bastidor)
Benceno, 13-74
calor:
de combustión, 3-197
específico, 3-163, 3-168, 3-170
de evaporación, 3-149, 3-153
latente, 3-147
compresibilidad del, 3-143
conductividad térmica, 3-291
constantes críticas, 3-135
datos de corrosión, 23-22 a 23-24
difusividad en, 3-303
expansión térmica, 3-130
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-65
propiedades del:
físicas, 3-31
termodinámicas, 3-220
relación de calor específico, 3-173
viscosidad del, 3-291, 3-293
Benedict-Webb-Rubin, ecuación de, 4-76, 4-75, 3-316, 13-18
Berl, sillas de, 18-22, 18-24 a 18-27, 18-29, 18-34 a 18-37, 18-84, 18-85
altura de las unidades de transferencia, 18-39
características de, 18-24
costo de, 18-47
Bernoulli, teorema de, 5-23
Bessel, ecuación de, 2-47
Bingham, fluidos plásticos de, 5-4
Bioquímica, 27-4
Biot, número de, 2-123, 4-10, 4-46
de masa, 4-46
térmico, 4-46
Bode, gráfica de, análisis del control, 22-24 a 22-26, 22-138 a 22-139
Boltzmann, constante de, 10-56
Bomba(s):
con acoplamiento cerrado, 6-10
capacidad de, 6-5
carga de las, 6-5
carga neta positiva de succión, 6-5
gráfica, 6-6
cavitación en, 6-5
centrífugas (*véase* Bombas centrífugas)
de chorro, 5-24 a 5-25, 6-17
costos de, gráfica, 6-7
con desplazamiento de fluido, 6-16
de desplazamiento positivo (*véase* Bombas de desplazamiento positivo)
de diafragma, 6-14
de diafragma activado neumáticamente, 6-14
difusión en, 6-35
dúplex de acción doble, 6-13
eficiencia de, 6-5, 6-13
electromagnéticas, 6-17
elevadora de presión de gas, 5-48
de émbolo buzo, 6-13 a 6-14
de engranes, 6-15
de flujo axial, 6-12
intervalo de operación, 6-7
gráfica, 6-7
limitaciones de succión en, 6-6
de medición, 6-14
mediciones de rendimiento, 6-5
de motor hermético, 6-9
de pistón, 6-13
potencia de las, 6-5
presencia de sólidos en, 6-7
de proceso, 6-9
para productos químicos, 6-9
proporcionales, 6-14
propulsores de, 6-12
de regeneración, 6-12
rotatorias, 6-15
selección de, 6-4 a 6-5
simples de acción doble, 6-13
de una sola etapa con succión doble, 6-9
de un solo cilindro, 6-13
de sumidero, 6-12
de tornillo, 6-16
de turbina, 6-12
verticales, 6-10
Bomba dúplex de acción doble, 6-14
Bomba simple de doble acción, 6-13
Bombas centrífugas, 6-8 a 6-12
acción de, 6-8
de acoplamiento
carga neta positi
costos de, gráfic
cubiertas, 6-8
curvas caracterí
de etapa sencilla
de etapas múltip
tipo difusor,
tipo voluta, 6
impulsores para
abiertos, 6-8
cerrados, 6-8
succion dobl
succión senc
de motor encerr
químicas, 6-9
de pozo, 6-10
de proceso, 6-9
sellos de, 6-10
con succión dol
verticales, 6-9
Bombas de chorro
Bombas de despla
costo de las, gr
de movimiento
de diafragm
eficiencia g
de émbolo b
de pistón, 6-
rotatorias, 6-15
de engranes
de tornillo,
Bombas de, diafr
Bombas electrom
Bombas de émbo
Bombas de émbo
Bombas de engra
Bombas de flujo
Bombas de impul
Bombas de regen
Bombas rotatoria
Bombas de turbir
Bombeo, 21-47
comportamien
de gases, 6-18
inestabilidad d
de líquidos, 6-
medios de
trabajo real
ondas de presi
Boudouard, reac
Brida(s):
capacidades d
ciegas, 6-83
presiones de p
para recipient
para tubos, 6-
dimension
Brodie, purifica
Bromley, correl
Bromo:

de acoplamiento cerrado, 6-10
carga neta positiva de succión, 6-5
costos de, gráfica, 6-7
cubiertas, 6-8
curvas características de, gráfica, 6-8
de etapa sencilla, 6-9
de etapas múltiples, 6-12
 tipo difusor, 6-8
 tipo voluta, 6-12
impulsores para, 6-8
 abiertos, 6-8
 cerrados, 6-8
 succion doble, 6-9
 succión sencilla, 6-9
de motor encerrado, 6-10
químicas, 6-9
de pozo, 6-10
de proceso, 6-9
sellos de, 6-10
con succión doble, 6-9
verticales, 6-9
Bombas de chorro, 6-17
Bombas de desplazamiento positivo, 6-13 a 6-17
 costo de las, gráfica, 6-8
 de movimiento alternativo, 6-13
  de diafragma, 6-13
  eficiencia global, 6-13
  de émbolo buzo, 6-13
  de pistón, 6-13
 rotatorias, 6-15 a 6-16
  de engranes, 6-15
  de tornillo, 6-16
Bombas de, diafragma, 6-14
Bombas electromagnéticas, 6-17 a 6-18
Bombas de émbolo, 6-13
Bombas de émbolo buzo, 6-13 a 6-14
Bombas de engranes, 6-15
Bombas de flujo axial, 6-12
Bombas de impulsor, 6-12
Bombas de regeneración, 6-12
Bombas rotatorias, sello de las, 6-36
Bombas de turbina, 6-12
Bombeo, 21-47
 comportamiento en régimen inestable, 5-68
 de gases, 6-18 a 6-39
 inestabilidad de, 6-25
 de líquidos, 6-4 a 6-18
  medios de producción, 6-4
  trabajo realizado, 6-5
 ondas de presión, 6-24
Boudouard, reacción de, 9-22 a 9-23
Brida(s):
 capacidades de presión-temperatura, tabla, 6-79 a 6-83
 ciegas, 6-83
 presiones de prueba de la cubierta hidrostática, tabla, 6-82
 para recipientes a presión, 6-128
 para tubos, 6-48 a 6-53, 6-75
  dimensiones de las, tabla, 6-49 a 6-52
Brodie, purificador, 17-12
Bromley, correlación de, 10-24
Bromo:
 calor:
  capacidad de, 3-155
  de formación, 3-178
 compresibilidad del, 3-143
 conductividad térmica, 3-291
 constantes críticas, 3-135
 densidad del, 3-98
 difusividad en, 3-303
 energía libre, 3-178
 expansión térmica, 3-130
 Prandtl, número de, 3-291
 presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-61
 propiedades:
  físicas, 3-11
  termodinámicas, 3-220
 relación de calor específico, 3-173
 solubilidad en agua, 3-120
 viscosidad del, 3-291, 3-293
Bronceado, 6-164
Bronce como material de construcción, propiedades del, 23-44
Bronsted, ecuación de, 4-14
Buchanan, ecuación de, 18-29
Buckingham, método pi de, 2-121 a 2-123
Bujes de estrangulación, 6-38
Bunsen, coeficiente de, 14-6 a 14-7
Buques tanque, 6-120
Burbuja(s):
 arrastre de, 18-64
 aumento de velocidad, 5-73
 definición de, 18-62
 efecto de chimenea, 18-66
 fenómeno interfacial, 18-74
 formación de:
  en orificios múltiples, 18-64
  en un solo orificio, 18-63
  teoría de, 18-62 a 18-63
 fraccionamiento de, 17-67 a 17-70
 generación de, 17-70
 métodos de precipitación, 18-68 a 18-70
 en las nubes, 18-66
 nucleación de, 18-68 a 18-70
 platos (charolas) con tapas, 18-4
 régimen:
  de burbuja sencilla, 18-63
  de chorro, 18-64
  intermedio, 18-63
 rociadores de, 18-66
 tabiques porosos, 18-67
 tamaño de, 18-63
 velocidad, aumento de, 5-73
Butadieno, propiedades termodinámicas del, 3-221
Butano:
 calor:
  de combustión, 3-195
  específico, 3-162, 3-164
  de evaporación, 3-150, 3-153
  de formación, 3-180
  latente, 3-147
 conductividad térmica, 3-291
 constantes críticas, 3-135
 densidad del, 3-98

energía libre, 3-180
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-67
propiedades:
físicas, 3-32
termodinámicas, 3-221 a 3-222, 3-243
viscosidad del, 3-291 a 3-293
Butanol, diagrama temperatura entropía para, 3-223

Cacharros, propiedades de los, 23-50
Caída de presión:
en canales, 5-26 a 5-37
en canales no circulares, 5-28 a 5-29
en codos, 5-43
curvos, 5-42 a 5-43
en ductos, 5-28 a 5-29
en empaques para torres, 5-61
en entradas, 5-41
en lechos de sólidos, 5-63 a 5-66
en orificios, 5-18
en toberas, 5-15 a 5-16
a través de placas desviadoras, 5-44
en tubos, 5-26 a 5-37
en tubos con aletas interiores, 5-29
en varios, 5-38
en espirales, 5-43
con flujo de dos fases, 5-45 a 5-46
en haces de tubos, 5-56 a 5-59
en medios porosos, 5-62
en medidores venturi, 5-14
en pantallas, 5-43 a 5-44
Calcinación, 20-41, 20-81 a 20-82
(*véase también* Secado)
Calcinadores de calor indirecto, 20-46 a 20-52
Calcio:
calores de formación, 3-178
propiedades físicas del, 3-12
Calcio, carbonato de:
calor:
capacidad de, 3-155
de formación, 3-180
latente, 3-144
conductividad térmica, 3-305
energía libre, 3-180
Calcio, cloruro de, 12-46
calor:
capacidad de, 3-155
de disolución, 3-198
específico, gráfica de, 12-147
latente, 3-144
conductividad térmica, gráfica de, 12-48
datos de corrosión, 23-24 a 23-26
energía libre, 3-177
expansión térmica, 3-130
gravedad específica, gráfica de, 12-49
propiedades físicas del, 3-12
solubilidad en agua, 3-121
viscosidad, gráfica de, 12-48

Calcio, hipoclorito de:
datos de corrosión, 23-24 a 23-26
propiedades físicas del, 3-12
Cálculo, 2-29 a 2-38
diferencial, 2-22 a 2-33
integral, 2-32 a 2-38
definido, 2-34 a 2-35
diferencias finitas en el, 2-79
indefinido, 2-32 a 2-34
teorema fundamental del, 2-35
de variaciones, 2-79 a 2-81
Cálculo integral, 2-29 a 2-38
Caldera de calor de desperdicio, 11-3
Calderas, 9-72
calor de desperdicio, 11-3
(*véase también* Generadores de vapor)
Calderas encamisadas, 11-38
Calderas industriales (*véase* Generadores de vapor, calderas industriales)
Calentadores:
de aire Ljungstrom, 9-102 a 9-103
de bayoneta, 11-33
de encendido directo, 9-67 a 9-68
de encendido indirecto, 9-68 a 9-72
generadores de vapor (*véase* Generadores de vapor)
regeneradores de calor (*véase* Regeneración de calor)
de succión del tanque, 11-9
Calentadores de bayoneta, 11-33
Calentamiento eléctrico, 9-61 a 9-67
calentadores de resistencias, 9-62
calentamiento por resistencias:
directo, 9-62 a 9-63
indirecto, 9-62 a 9-63
dieléctrico, 9-64, 9-65
estufas, 9-62 a 9-64
hornos, 9-62 a 9-63
por inducción, 9-64
infrarrojo (IR), 9-64
Joule, ley de, 9-62
laser, 9-62 a 9-67
por microondas, 9-66
de plasma (arco eléctrico), 9-66 a 9-67
Calibradores de lámina de metal, 1-21
Calor(es):
de combustión:
compuestos orgánicos, 3-195 a 3-197
del petróleo, 9-12 a 9-14
tabla, 9-43
definición del, 4-59
efectos del, en la absorción de gas, 14-26 a 14-29
de evaporación, 3-144 a 3-146
de compuestos orgánicos, 3-149 a 3-154
latente, cálculo del, 4-75
de formación, 3-177 a 3-194
de fusión, 3-144 a 3-148
de compuestos inorgánicos, 3-144 a 3-146
de compuestos orgánicos, 3-147 a 3-148
de los elementos, 3-144 a 3-146
de materiales varios, 3-154
generación de:
en calentamiento eléctrico (*véase* Calentamiento eléctrico)

por combustib
por combustib
por combustib
Combusti
en la combust
en reactores q
por vapor (*vé*
de solución, 3-19
compuestos i
compuestos o
Calor, intercambia
Calores específico
de combustibles
de componentes
de compuestos i
de elementos, 3-
gráficas de aline
de gases, 3-1
de líquidos, 3
de líquidos orgá
de materiales m
relaciones de, p
de sólidos orgán
de soluciones a
Calores húmedos,
definición de lo
Calores latentes, t
Callow, celda de,
Cámaras de humi
definición de la
Cambio fracciona
definición del,
en etapa semiin
en lechos móvi
por lotes, 16-49
Caminos, estimac
Camiones tanque
Canales abiertos,
Canales, flujo en,
abiertos, 5-31
no circulares, 5
Capacidad:
de bombas, 6-5
de sopladores,
de tanques, 6-1
Capacidad de ads
Capacidad de cal
Capa límite de flu
Capital, compra y
Capital, financia
Capital de trabajo
Carbón:
absorbente, 16
calor:
capacidad
de com
de form
latente
conductividad
energía libre,
expansión tém

    - por combustibles gaseosos (*véanse* Combustibles; Combustión)
    - por combustibles líquidos (*véanse* Combustibles; Combustión)
    - por combustibles sólidos (*véanse* Carbón; Coque; Combustibles; Combustión)
    - en la combustión (*véase* Combustión)
    - en reactores químicos, 4-36
    - por vapor (*véase* Generadores de vapor)
  - de solución, 3-198 a 3-201
    - compuestos inorgánicos en agua, 3-198 a 3-201
    - compuestos orgánicos en agua, 3-201
- Calor, intercambiadores de (*véase* Intercambiadores de calor)
- Calores específicos, 3-154 a 3-176
  - de combustibles derivados del petróleo, 9-15
  - de componentes puros, 3-154 a 3-180
  - de compuestos inorgánicos, 3-155 a 3-162
  - de elementos, 3-155 a 3-162
  - gráficas de alineamiento:
    - de gases, 3-169
    - de líquidos, 3-168
  - de líquidos orgánicos, 3-163 a 3-166
  - de materiales misceláneos, 3-176
  - relaciones de, para gases, 3-173
  - de sólidos orgánicos, 3-170 a 3-172
  - de soluciones acuosas, 3-174 a 3-176
- Calores húmedos, 20-5
  - definición de los, 12-3
- Calores latentes, tablas, 3-143 a 3-154
- Callow, celda de, 21-52
- Cámaras de humidificación, 11-30
  - definición de las, 18-3
- Cambio fraccionario en las transiciones de sorción:
  - definición del, 16-9
  - en etapa semiintermitente, 16-50
  - en lechos móviles, 16-51
  - por lotes, 16-49 a 16-50
- Caminos, estimación del costo de, 25-81
- Camiones tanque, 6-118
- Canales abiertos, flujo en, 5-31
- Canales, flujo en, 5-25 a 5-44
  - abiertos, 5-31
  - no circulares, 5-28 a 5-29
- Capacidad:
  - de bombas, 6-5
  - de sopladores, 6-25
  - de tanques, 6-113
- Capacidad de adsorción de solventes comunes, 26-28
- Capacidad de calor, 3-322 a 3-325
- Capa límite de fluido, 5-64
- Capital, compra y venta de, 25-46
- Capital, financiamiento por, 25-45 a 25-46
- Capital de trabajo, 25-55 a 25-58
- Carbón:
  - absorbente, 16-9
  - calor:
    - capacidad de, 3-156
      - de combustión, 3-195
      - de formación, 3-180
      - latente, 3-144
  - conductividad térmica, 3-305
  - energía libre, 3-180
  - expansión térmica, 3-127
  - como material de construcción, 23-55
  - molienda de los productos del, 8-65
  - presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-60
  - propiedades físicas del, 3-13
- Carbón mineral:
  - análisis aproximado del, tabla, 9-4
  - análisis final del, 9-4
  - azufre en el, 9-6
  - características del, para generadores de vapor, 9-76 a 9-77
  - carbón fijo, 9-4
  - cenizas de, 9-4, 20-128 a 20-129
    - características de las, 9-6
    - composición de las, tabla, 9-6
  - clasificación del, tabla, 9-3
  - combustibles derivados del, 9-15 a 9-18
    - propiedades de los, tabla, 9-22
  - combustibles líquidos derivados del, 9-15
  - combustión en lechos fluidificados, 20-82
  - composición del, 9-4
  - conversión a combustibles sintéticos, 9-20
  - coque (*véase* Coque)
  - encendido de lechos combustibles de, 9-46 a 9-47
  - encendido por suspensión del, 9-46 a 9-49
  - encendido pulverizado del, 9-46 a 9-49
  - ensayo de Fischer, 9-8 a 9-9
  - gasificación del, 9-20
    - antecedentes de la, 9-28 a 9-29
    - aplicaciones de la, 9-29
    - aspectos económicos de la, 9-29
    - purificación del gas, 9-29 a 9-30
    - refinamiento del gas, 9-29 a 9-30
    - sistemas de iluminación de gas ácido para la, tabla, 9-29
    - teoría de la, 9-20 a 9-29
  - índice de esponjamiento libre (FSI), 9-7
  - licuefacción directa del, 9-29 a 9-30
    - antecedentes, 9-30
    - aspectos económicos de la, 9-41
    - cinética de la, 9-30 a 9-33
    - hidropirólisis instantánea, 9-35 a 9-40
    - pirólisis instantánea, 9-40
    - proceso con carbón refinado por solvente (SRC), 9-30, 9-33 a 9-34
    - proceso Exxon de solvente donador (EDS), 9-30, 9-33 a 9-35
    - proceso H-Coal, 9-30, 9-33 a 9-34
    - procesos de pirólisis del carbón, 9-40 a 9-41
  - licuefacción indirecta del, 9-40 a 9-41
    - aspectos económicos de la, 9-41
    - Fischer-Tropsch, síntesis, 9-40 a 9-41
    - proceso metanol a gasolina para, 9-41
    - proceso syngas a gasolina, 9-41
    - SASOL, procesos, 9-41
  - mezcla carbón-petróleo, 9-9
  - molienda del, 8-65
  - origen del, 9-3
  - procesos de gasificación del, 9-23 a 9-24
    - por arrastre (suspensión), 9-24 a 9-25
    - COGAS, proceso, 9-27
    - HYGAS, proceso, 9-27
    - Koppers-Totzek, gasificador, 9-24 a 9-25
    - Lurgi, gasificador, 9-24
    - nuevos desarrollos en los, 9-25 a 9-28

reactores de lecho fluidizado para los, 9-24
reactores de lecho móvil para los, 9-23
U-gas, proceso, 9-27
Westinghouse, proceso, 9-27
Winkler, gasificador, 9-25
propiedades físicas del, 9-7
prueba de friabilidad, 9-7
pulverizadores de, 9-49
valor calorífico del, 9-4 a 9-6
alto, 9-4 a 9-6
bajo, 9-4 a 9-6
tabla, 9-4
Carbono, dióxido de:
absorción del, en carbón activado, 16-35 a 16-36
calor:
capacidad de, 3-156
específico, 3-169
de evaporación, 3-153
de formación, 3-179
latente, 3-144
compresibilidad del, 3-138
conductividad térmica, 3-291, 3-298
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividad en, 3-303
difusividades de pares de gases, 3-301
energía libre, 3-180
Joule-Thomson, coeficiente, 3-133
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-60
hasta 1 atm, 3-61, 3-68
propiedades físicas del, 3-13
propiedades termodinámicas del, 3-223 a 3-224
razón de calor específico, 3-173
sistema aire agua, 18-43 a 18-44
solubilidad en agua, 3-121
viscosidad del, 3-291, 3-293 a 3-295
Carbono, disulfuro de:
calor:
específico, 3-168
de evaporación, 3-151 a 3-152
conductividad térmica, 3-297
constantes críticas, 3-135
datos de corrosión, 23-24 a 23-26
difusividad en, 3-303
difusividades en pares de gases, 3-301
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-61, 3-68
propiedades físicas del, 3-13, 3-33
razón de calor específico, 3-173
viscosidad del, 3-292, 3-296
Carbono, monóxido de:
calor:
capacidad de, 3-156
de combustión, 3-195
específico, 3-169
de formación, 3-180
compresibilidad del, 3-139
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-180
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-60, 3-81
hasta 1 atm, 3-61, 3-68
propiedades físicas del, 3-13, 3-33
propiedades termodinámicas del, 3-224 a 3-225
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-121, 3-124
viscosidad del, 3-292, 3-293
Carbono, tetracloruro de:
calor:
específico, 3-163, 3-168, 3-170
de evaporación, 3-151 a 3-152
latente, 3-144, 3-147
compresibilidad del, 3-143
conductividad térmica, 3-291, 3-297 a 3-298
constantes críticas, 3-135
datos de corrosión, 23-24 a 23-26
difusividad en, 3-303
difusividades en pares de gases, 3-301
expansión térmica, 3-130
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-61, 3-68
propiedades físicas del, 3-33
propiedades termodinámicas del, 3-226 a 3-227
viscosidad del, 3-291, 3-293 a 3-296
Cardiode, 2-23
Carga(s):
de bombas, 6-5
de compresión adiabática, 6-18
en compresores centrífugos, 6-24
estática, 5-6
de fluidos, 5-6
de fricción, 5-7
en medidores de flujo, 5-13 a 5-20
de presión, 5-7
en recipientes de almacenamiento, 6-113 a 6-115
en sopladores, 5-26
de velocidad, 5-6
Carga hidrostática, 11-40
Carga, mecanismos de, en separación electrostática, 21-46
Carga neta positiva de succión (NPSH), 6-6
gráfica, 6-6
Carga de velocidad, 5-7
Carleman, desigualdad de, 2-11
Carnot, ciclo de, 12-26
coeficiente de funcionamiento, 12-26
Carros tanque, 6-117
Cascos giratorios para la transferencia de calor, 11-54
Catálisis:
características de, 4-13
centros activos (sitios del catalizador), 4-17
factor de eficiencia en, 4-43
reacciones autocatalíticas, 4-36
reacciones catalizadas por sólidos, 4-14 a 4-17
ecuaciones de velocidad, tabla, 4-16
factores que afectan las, 4-14
mecanismo de
tabla, 4-15
reacciones hetero
reacciones homo
en fase gaseos
en fase líquid
Catalizadores:
agente activo en,
apoyo (portador)
área de la superfi
externa, 4-42
interna, tabla,
centros activos d
constituyentes d
envenenamiento
gradiente de tem
módulos de los
poro:
difusión por,
radio del, tab
volumen del,
porosidad, 4-41
presión parcial
promotores, 4-4
selección de, 4-
temperatura en
Catenaria, 2-13, 2-
Cauchy, prueba de
Cauchy-Schwartz
Cavitación, 5-68,
Celda de corrosió
Células (organism
Centrífugas, 19-9
de abertura aut
de cámaras múl
de canasta, 19-
con fondo al
suspendida
velocidad c
de velocida
de canasta con
de cojinete de
costos de, 19-1
compra, 19
instalación,
mano de ob
mantenimie
de decantación
tazón de m
con descarga p
con descarga d
diámetro críti
para dispersio
como dispositi
característi
selección d
teoría de, 1
esfuerzos en l
como filtros, 1
ciclo de op
continuos,

mecanismo de, 4-14 a 4-16
tabla, 4-15
reacciones heterogéneas, 4-14
reacciones homogéneas, 4-13
en fase gaseosa, 4-13
en fase líquida, 4-13
Catalizadores:
agente activo en, 4-41
apoyo (portador), 4-41
área de la superficie:
externa, 4-42
interna, tabla, 4-45
centros activos de, 4-47
constituyentes de, 4-41
envenenamiento, 4-46
gradiente de temperatura interna, 4-43
módulos de los gránulos, 4-46
poro:
difusión por, 4-43
radio del, tabla, 4-45
volumen del, tabla, 4-45
porosidad, 4-41 a 4-42
presión parcial en la superficie de, 4-43
promotores, 4-41
selección de, 4-47
temperatura en la superficie, 4-43
Catenaria, 2-13, 2-23
Cauchy, prueba de la raíz de, 2-39
Cauchy-Schwartz, desigualdad de, 2-11
Cavitación, 5-68, 6-5
Celda de corrosión por concentración de oxígeno, 23-3
Células (organismos), 27-3
Centrífugas, 19-99 a 19-114, 21-3
de abertura automática, 19-103 a 19-104
de cámaras múltiples, 19-102
de canasta, 19-106
con fondo abierto, 19-107
suspendida con eslabones, 19-106 a 19-107
velocidad constante, 19-108 a 19-109
de velocidad variable, 19-106
de canasta con fondo sólido, 19-106
de cojinete de bancada, 19-106
costos de, 19-111 a 19-114
compra, 19-111 a 19-112
instalación, 19-112 a 19-113
mano de obra de operación, 19-103
mantenimiento, 19-103
de decantación continua, 19-104 a 19-105
tazón de malla, 19-105
con descarga periférica, 19-103
con descarga de tobera, 19-103
diámetro crítico, 19-105
para dispersiones líquido líquido, 21-70
como dispositivos de sedimentación, 19-101 a 19-106
características de funcionamiento de, 19-105
selección de, 19-113
teoría de, 19-105 a 19-106
esfuerzos en los rotores de, 19-99
como filtros, 19-106 a 19-111
ciclo de operación para, 19-108
continuos, 19-109
drenaje en, 19-110
selección de, 19-113
teoría de, 19-110
velocidad de filtración, 19-110
fuerza en, 19-100
materiales de construcción, 19-101
de movimiento alternativo ("de empuje"), 19-109 a 19-110
principios generales de, 19-99 a 19-100
aceleración centrífuga, 19-99
fuerza centrífuga, 19-99
requerimientos de potencia, 19-112 a 19-114
selección de, 19-113
suspendidas en la parte superior, 19-107
suspendidas con eslabones y descarga por el fondo, 19-99
de tazón sólido, 21-24
de tazón tubular, 19-101 a 19-102
tipo disco, 19-102 a 19-103
velocidad crítica de, 19-101
Centros activos, 4-47
Cero, operaciones con, 2-15
Cesio, propiedades termodinámicas del, 3-227
Ciclohexano, 13-74
n-heptano, destilación del sistema, 18-20
Ciclones, 20-90
para dispersión líquido líquido, 21-71
Ciclos:
en adsorción, 16-38 a 16-39
de Claude, gráfica, 12-54
de Linde, 12-53
de refrigeración, 12-53 a 12-54
refrigerante mixto, 12-54
de tres niveles en cascada, 12-54
Cifra de mérito, 12-56
Cilindro:
área del, 2-13
volumen del, 2-13
Cilindro, elíptico, 2-26
Cilindro, hiperbólico, 2-26
Cilindro parabólico, 2-26
Cinc, 20-41
Cinc:
cloruro de, datos de corrosión, 23-33 a 23-35
sulfato de, datos de corrosión, 23-33 a 23-35
Cinética (*véanse* Catálisis; Cinética de la reacción; Reacciones químicas)
Cinética de la reacción:
para mecanismos sencillos, 16-24
modelo CSF, 16-40 a 16-41
modelo para la velocidad de sorción, 16-28 a 16-29
resolución de equilibrio no lineal, 16-32 a 16-36
técnicas experimentales, 4-17 a 4-19
análisis diferencial térmico, 4-19
cromatografía de gases, 4-19
espectrofotometría de absorción, 4-19
método estadístico empírico, 4-17
rastreador radiactivo, 4-18
reactor a escala reducida, 4-17
resonancia del espín del electrón, 4-18
resonancia magnética nuclear, 4-18
verificación del mecanismo, 4-17

Cinética de la reacción enzimática, 27-19 a 27-21
Circonio, ladrillo de, como material para alta temperatura, 23-71
Circonio, como material de construcción, 23-38, 23-40, 23-46
Círculo(s):
  área del, 2-12
    segmentos de, 1-27
  ecuaciones del, 2-21 a 2-23
Clapeyron, ecuación de, 4-75
Clarificadores, 19-64 a 19-66
  de cartucho, 19-93
    flexibilidad de, 19-94
    micrónico, 19-93 a 19-94
  circulares, 19-65
  de contacto de sólidos, 19-66
  criterios de diseño y condiciones de operación, 19-71
  espesadores, 19-65
  de placa inclinada, 19-65 a 19-66
  rectangulares, 19-65
  tipo filtro, 19-92
  varios, 19-96 a 19-97
Clasificación automática, 21-59 a 21-60
Clasificación en húmedo, 21-21 a 21-26
  definición de, 21-21
  equipo para, 21-21
Clasificación sobre mesas, 21-28 a 21-30
  por aglomeración, 21-30
  costos de la, 21-29
  en húmedo, 21-28 a 21-30
  en seco, 21-29
Clasificadores, 21-21 a 21-23
  de arrastre, 21-23
  centrífugos de tazón de sólidos, 21-24
  de ciclón líquido, 21-21
  de cono, 21-21
  a contracorriente, 21-25
  costos de, 21-24 a 21-26
    tabla, 21-24
  D-O SiphonSizer, 21-26
  espirales, 21-24
  hidráulicos, 21-25
  de hidroseparador, 21-24
  de rastrillo, 21-23
  de tazón, 21-23
  de tazón desedimentador, 21-24
  tipo Jet Sizer, 21-25
  tipo SuperSorter, 21-25
Cloración, 20-41
Cloro:
  calor:
    específico, 3-169
    de formación, 3-181
    latente, 3-144
  conductividad térmica, 3-291
  constantes críticas, 3-135
  densidad del, 3-98
  difusividad en, 3-303
  energía libre, 3-181
  Prandtl, número de, 3-291
  presión de vapor del:
    arriba de 1 atm, 3-59
    hasta 1 atm, 3-61
  propiedades físicas del, 3-13
  propiedades termodinámicas del, 3-227
  relación de calor específico, 3-173
  solubilidad en agua, 3-121 a 3-125
  viscosidad del, 3-291 a 3-293
Cloroformo:
  calor:
    específico, 3-163, 3-168
    de evaporación, 3-152 a 3-153
  compresibilidad del, 3-143
  conductividad térmica, 3-297
  constantes críticas, 3-135
  densidad del, 3-118
  difusividad en, 3-303
  expansión térmica, 3-130
  presión de vapor del: hasta 1 atm, 3-67
  propiedades físicas del, 3-34
  relación de calor específico, 3-173
  viscosidad del, 3-292 a 3-296
Cloruro férrico, datos de corrosión, 23-27 a 23-29
Cloruro ferroso, datos de corrosión, 23-27 a 23-29
Coalescedores, 21-75
Coalescencia, 21-75
Coalescencia, velocidades de, 21-75
Cobre y sus aleaciones como material de construcción,
    propiedades del, 23-44 a 23-45
Cobre, sulfato de, datos de corrosión, 23-27 a 23-29
Codos, 5-42 a 5-43
  caída de presión, 5-43
  fuerzas sobre, 5-23
  de tubería, 6-56
    angulares, 6-83
Codos como accesorios, 6-56
Coeficiente de actividad, 4-69, 4-73 a 4-74
  media iónica, 4-97
Coeficiente de separación, 15-5
Coeficientes:
  de arrastre, 5-71 a 5-72
  de descarga:
    orificios, 5-6 a 5-18
    pantallas, 5-44
    toberas de flujo, 5-15
    Venturi, medidores, 5-15
  de transferencia de calor (*véase* Transferencia de calor,
    coeficiente de)
Coeficientes de descarga:
  para medidores Vénturi, 5-15
  para orificios, 5-16 a 5-18
  para pantallas, 5-45
  para toberas de flujo, 5-15
Cofactor, 2-18
Cogeneración, 9-92
  (*véase también* Transferencia de calor, sistemas de)
Cojinetes, 24-38, 24-56 a 24-58
  de bolas y rodillos, 24-54
  capacidad de carga, 24-54
  de empuje, 24-38 a 24-54
  radiales, 24-38
  con recolección de aceite, 24-54
  sistemas de lubricación, 24-56
  tipos de, 24-54
Colburn, ecuación
Colburn, factor J d
  Chilton-, 14-12
  para transferenc
Colectores de cicl
Colectores eléctric
Colectores de nieb
Colligend, definic
Coloides, molinos
Columnas:
  arrastre en las, 1
  para contacto g
    18-48 a 18-5
  empacadas (*vé*
  empaques cont
  espuma en las,
  de inundación
  de paredes húm
  de platos (*véas*
  de platos desvi
  (*véase también*
Columnas de bur
  coeficientes de
  dispersión axi
  retención de g
  transferencia d
Columnas empac
  columnas puls
  costo de la col
  costo de los co
  platos contra e
  optimización,
  (*véase tambié*
Columnas de pa
  inundación en
Columnas de pla
    18-21 a 18
Columnas pulsa
Combustibles:
  combustión d
  costos de, 9-1
  gaseosos, 9-1
    acetileno,
    caracterís
    factor de s
    gas para al
    gas azul d
    gas de car
    gas carbu
    gas natura
    gas natura
    gas de pet
    gas pobre,
    gas reform
    gases de a
    hidrógen
    impureza
    temperat
  en generado
  líquidos, 9-1
    de aceite

Colburn, ecuación de, 16-52
Colburn, factor J de, 10-12
Chilton-, 14-12
para transferencia de masa, 4-52
Colectores de ciclón, 26-21
Colectores eléctricamente aumentados, 18-92
Colectores de niebla de malla de alambre, 18-86
Colligend, definición de, 17-65
Coloides, molinos de, 8-51 a 8-52
Columnas:
arrastre en las, 18-4
para contacto gas-líquido, aspectos económicos en las, 18-48 a 18-51
empacadas (*véase* Torres empacadas)
empaques contra platos, 18-21 a 18-24, 18-50, 26-22
espuma en las, 18-5
de inundación con flujo descendente, 18-5
de paredes húmedas, 18-46 a 18-48
de platos (*véase* Torres de platos)
de platos desviadores, 18-5
(*véase también* Torres)
Columnas de burbujeo:
coeficientes de transferencia de masa en la fase líquida, 18-75
dispersión axial en, 18-75 a 18-76
retención de gas en, 18-74 a 18-75
transferencia de masa en, 18-73 a 18-74
Columnas empacadas, 18-21 a 18-44
columnas pulsadas, 21-87
costo de la columna, 18-50
costo de los componentes internos, 18-50
platos contra empaques, 18-21 a 18-24, 18-50, 26-22
optimización, 18-50 a 18-51
(*véase también* Torres empacadas)
Columnas de paredes mojadas, 18-46 a 18-48
inundación en, 18-48
Columnas de platos comparadas con columnas empacadas, 18-21 a 18-24, 18-50, 26-22
Columnas pulsadas, 21-87
Combustibles:
combustión de (*véase* Combustión)
costos de, 9-19
gaseosos, 9-16 a 9-19
acetileno, 9-18 a 9-19
características de combustión de los, 9-59 a 9-60
factor de supercompresibilidad, 9-19
gas para altos hornos, 9-18
gas azul de agua, 9-18
gas de carbón, 9-18
gas carburado de agua, 9-18, 9-20
gas natural, 9-16 a 9-18
gas natural licuado, 9-18
gas de petróleo licuado, 9-18
gas pobre, 9-18
gas reformado, 9-18
gases de aceites, 9-18
hidrógeno, 9-19
impurezas de azufre en los, 9-19
temperaturas de flama adiabática de, 9-59 a 9-60
en generadores de vapor, 9-73 a 9-78
líquidos, 9-10 a 9-16
de aceites esquistos, 9-16
de alquitrán de carbón, 9-16
combustibles del petróleo (*véase* Petróleo)
derivados del petróleo, 9-16
recursos de, tabla, 9-3
reservas de, tabla, 9-3
sólidos, 9-3 a 9-10
bagazos, 9-9
biomasas, 9-9 a 9-10
carbón (*véase* Carbón)
carbón vegetal, 9-8
coque, 9-7 a 9-8
coque inferior, 9-8
cortezas de curtiduría, 9-8
desperdicios, 9-8 a 9-9
maderas, 9-8
mezcla de carbón y aceite, 9-12
turba, 9-9
de petróleo, gravedad API de los, 13-76
valores característicos del poder calorífico de los, gráfica, 9-21
Combustión:
calor de, del petróleo, 9-12 a 9-15
de contaminantes, 26-29 a 26-32
de craqueo, definición de la, 9-56
equipo para la combustión de combustibles sólidos, tabla, 9-46
equipo de combustión con encendido directo, definición del, 9-67
equipo de combustión con encendido indirecto, 9-68 a 9-72
definición del, 9-68
precalentadores, 9-68
reactores de encendido, 9-68 a 9-69
recalentadores de columna, 9-68
transferencia de calor en el, 9-68
estequiometría de la, 9-42 a 9-44
exceso de aire para, 9-42 a 9-45
en emparrillados, 9-48
métodos de encendido, 9-46
para cargadores, 9-45 a 9-47, 9-47 a 9-49
para la combinación de distribuidores-cargadores, 9-45 a 9-47 , 9-47 a 9-49
para combustibles gaseosos, 9-57 a 9-58
para combustibles líquidos, 9-55 a 9-58
para combustibles sólidos, 9-45 a 9-55
para combustibles pulverizados, 9-48 a 9-49
equipo para la combustión de combustibles sólidos, tabla, 9-46
para lechos combustibles, 9-46
en lechos fluidificados (*véase* Lechos fluidificados)
para suspensión, 9-48 a 9-49
oxígeno (aire) teórico para la, 9-44
productos de la, 9-44
entalpía de los, 9-45
temperatura adiabática de flama:
de gases fabricados, 9-59
de gases, tabla, 9-60
Combustión atmosférica de lecho fluidizado (AFBC) (Atmospheric Fluidized-bed combustion), 9-54
Combustión, constantes de la, tabla, 9-43
Combustión, máquinas de
Combustión a presión de lecho fluidizado (PFBC), 20-82
Combustión, sistemas de, ventajas y desventajas, 26-22
Combustión, turbinas de gas de, 24-33 a 24-36
características de operación de las, 24-35
limitaciones del combustible, 24-34

eficiencia de las, 24-33
opciones de diseño de las, 24-34
Compactación por presión, 8-71 a 8-75
de aglutinantes y lubricantes, 8-71
ecuaciones de compresión de polvos, 8-71
equipo para la, 8-72 a 8-75
extrusores de tornillo, 8-74
molinos de granulación, 8-74
prensas de pastillaje, 8-72
prensas de pistón o moldeo, 8-72
prensas de rodillos, 8-73
transmisión de fuerzas en la, 8-71
Complejo petroquímico de refinería:
control del, 22-112 a 22-116
optimización del, 22-115
Componente de una central nuclear, 6-124
Componentes clave, 13-39
Componentes puros, constantes de los, 3-310 a 3-312
Comportamiento de la capa límite, 5-64 a 5-67
placa plana finita, 5-64
superficie cilíndrica:
continua, 5-65
finita, 5-64
superficie plana continua, 5-64 a 5-67
Composición química, analizadores de (*véase* Analizadores de composición química)
Compresibilidad, factor de, 3-313 a 3-314
Compresibilidad, factor Z de, 4-64, 9-19
Compresibilidades, 3-136 a 3-143
de líquidos, 3-143
de sólidos, 3-143
Compresión:
adiabática, 6-18, 6-18 a 6-22
isotérmica, 6-18
politrópica, 6-18
trabajo de, 6-18
valores X de, para aire y gases ideales, tabla, 6-19 a 6-21
Compresor(es):
de alta presión, 6-31
aplicación de los, tabla, 6-22
axiales, 6-24
capacidad de los, 17-75
centrífugos, 6-24
de cilindros no lubricados, 6-31
costos de los, 6-22
gráfica, 6-22
descargadores de los, 6-30
de diafragma, 6-32
metálico, 6-32
dispositivos de control para, 6-29
de émbolo, 6-27 a 6-32
de etapas múltiples, 6-21
rotatorios (*véase* Compresores rotatorios)
selección de los, 6-21
Compresores axiales, 6-24
Compresores centrífugos, 6-24
Compresores de movimiento reciprocante, 6-27 a 6-32
Compresores rotatorios, 6-25 a 6-27
curva característica de los, gráfica, 6-26
de lóbulos rectos, 6-27
de paletas corredizas, 6-27
de pistón de líquido, 6-27
sello de los, 6-36 a 6-39
tipo tornillo, 6-27
Compuerta de tiro, 6-25
Compuestos inorgánicos:
calor:
específico, 3-155 a 3-162
de evaporación, 3-144 a 3-146
de formación, 3-177 a 3-194
de fusión, 3-144 a 3-146
de solución, 3-198 a 3-202
constantes críticas, 3-135 a 3-136
densidad de las soluciones acuosas de los, 3-99 a 3-108
energía libre, 3-179 a 3-194
presión de vapor de los:
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-60 a 3-63
propiedades físicas de los, 3-7 a 3-27
Compuestos orgánicos:
calores:
de combustión, 3-195 a 3-197
de disolución en agua, 3-201
de formación, 3-177 a 3-194
de fusión, 3-147 a 3-148
calores específicos:
de líquidos, 3-163 a 3-167
de sólidos, 3-170 a 3-172
constantes críticas, 3-135 a 3-136
densidad de las soluciones acuosas, 3-109 a 3-117
energía libre, 3-177 a 3-194
presiones de vapor de:
arriba de 1 atm, 3-81
hasta 1 atm, 3-65 a 3-81
propiedades físicas de, 3-28 a 3-56
Computadora a computadora, transmisión de (*véase* Transmisión de señales, digital)
Computadoras:
hardware, 22-117 a 22-119
software, 22-119
Concentración espiral, 21-30
características de operación de la, 21-31
costo de la, 21-32
mantenimiento de la, 21-31
requerimientos para la, 21-31
Concentradores:
espirales, 21-30 a 21-31
magnéticos, 21-41
Conceptos biológicos, 27-3 a 27-5
algas, 27-3
bacterias, 27-3
células, 27-3
energía, 27-4 a 27-5
fotosíntesis, 27-5
genética, ingeniería, 27-5
hongos, 27-3 a 27-4
ingeniería genética, 27-5
virus, 27-4
Condensación, 10-20 a 10-21
coeficientes de, 10-20 a 10-21
en bancos de tubos horizontales, 10-21
condensación de la película de vapor puro, gráfica, 10-23
horizontal de
en tubos hori
en tubos verti
vertical dentr
Condensación en f
Condensación de p
Condensador(es), 1
aéreos, 11-30
barométricos, 11
de contacto, 26-
definición de los
diseño de los, 10
para eyectores, 6
de multicompon
de un solo comp
horizontal de
horizontal de
vertical dent
vertical dent
de superficie, 26
de vapor, 11-31
Conducción, trans
conductividad t
definición de la,
ecuación tridim
estado estaciona
bidimension
con generaci
a través de c
a través de c
tridimension
unidimensio
estado no estaci
bidimension
con cambio
curvas de tra
gráficas de C
unidimensio
Fourier, ley de,
Conductividad elé
Conductividades t
de aceros de baj
cálculos para ga
para líquidos
de combustibles
gráfica, 9-15
de gases, 3-291
de líquidos, 3-2
para materiales
medición de las
de metales, 3-3
Conductores desc
Congeladores, 11-
Cono, 2-25
área del, 2-14
volumen del, 2-
Constante dieléct
Constante de equi
4-89 a 4-91
general, 4-17
Constante(s):

horizontal dentro del tubo, 10-21
en tubos horizontales, 10-21
en tubos verticales, 10-20 a 10-21
vertical dentro del tubo, 10-21
Condensación en forma de niebla, 18-52, 18-58 a 18-59
Condensación de pivote que involucra matrices, 2-61
Condensador(es), 10-32 a 10-34, 11-26, 26-22
aéreos, 11-30
barométricos, 11-46
de contacto, 26-32
definición de los, 11-3
diseño de los, 10-33
para eyectores, 6-33
de multicomponentes, 10-33
de un solo componente, 10-32 a 10-33
horizontal dentro de la cubierta, 10-33
horizontal dentro del tubo, 10-33
vertical dentro de la cubierta, 10-32
vertical dentro del tubo, 10-33
de superficie, 26-32
de vapor, 11-31
Conducción, transferencia de calor por:
conductividad térmica en la, 10-7 a 10-8
definición de la, 10-7
ecuación tridimensional de la, 10-7
estado estacionario, 10-8 a 10-9
bidimensional, 10-9
con generación de calor, 10-9
a través de cuerpos en paralelo, 10-9
a través de cuerpos en serie, 10-9
tridimensional, 10-8
unidimensional, 10-8
estado no estacionario, 10-9 a 10-10
bidimensional, 10-10
con cambio de fase, 10-11
curvas de trabajo para varios cuerpos, gráficas, 10-9
gráficas de Gurney-Laurie para varias geometrías, 10-9
unidimensional, 10-9 a 10-10
Fourier, ley de, 10-7
Conductividad eléctrica, 21-3
Conductividades térmicas, 3-305 a 3-308
de aceros de baja aleación, 23-47
cálculos para gases, 3-329 a 3-332
para líquidos, 3-331
de combustibles derivados del petróleo, 9-15
gráfica, 9-15
de gases, 3-291 a 3-299
de líquidos, 3-297
para materiales de construcción, 3-305 a 3-308
medición de las, 22-39 a 22-52
de metales, 3-306 a 3-307
Conductores descendentes en torres de platos perforados, 21-81
Congeladores, 11-26
Cono, 2-25
área del, 2-14
volumen del, 2-14
Constante dieléctrica en el análisis oscilométrico, 22-54
Constante de equilibrio de la reacción química, 4-5, 4-14 a 4-16, 4-89 a 4-91
general, 4-17
Constante(s):
críticas, 3-135 a 3-136
predicción de las, 3-310 a 3-312
físicas, 1-22
de la ley de los gases, 1-18
matemáticas varias, 2-8
Constantes físicas, 1-22
Construcción, costo del tiempo de, 25-82
Construcción del lado del casco, 11-13
Construcción, materiales de (*véase* Propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción y materiales específicos)
Contabilidad, 25-40 a 25-58
acciones, compra y venta de, 25-46
administración y costo, 25-51
balance de, 25-42
capital:
costo de, 25-49 a 25-51
de trabajo, 25-55 a 25-58
capital financiero, 25-46
cierre de libros, 25-41
contabilidad, tipos de, 25-43
convenciones de, 25-41 a 25-42
datos comparativos de, de la empresa, 25-48 a 25-49
distribución de costos indirectos, 25-51
estados de pérdidas y ganancias, 25-43
evaluación de inventarios, 25-52 a 25-58
financiamiento:
de la deuda, 25-46
por deuda, 25-45
financiamiento del activo con capital propio y con deuda, 25-43 a 25-48
partida doble, 25-41
principios de, 25-40 a 25-43
ahorros retenidos, 25-46
razones financieras, 25-43 a 25-45
utilidades retenidas, 25-46
Contactores de disco rotatorio, 21-83 a 21-84
Contactores líquido-sólido (*véanse* Agitadores; Mezcladores)
Contaminación:
atmosférica, medición de la, 20-90
(*véanse también* Contaminación del agua; Contaminación del aire)
Contaminación del agua:
características del agua de desperdicio, 26-41 a 26-42
oxígeno disuelto, 26-47
pH y alcalinidad, 26-42
sustancias inorgánicas, 26-42
sustancias orgánicas, 26-41 a 26-42
temperatura, 26-42
colocación de lechadas, 26-51
esparcimiento del terreno, 26-51
rellenos sanitarios del terreno, 26-51
conservación del agua, 26-51
control estatal de la contaminación del agua, 26-41
legislación, reglamentos y oficinas en EE UU, 26-41
Environmental Protection Agency (EPA), 26-41
legislación federal, 26-41
ley de descarga nula, 26-41
pretratamiento del agua, 26-37 a 26-40
ecualización, 26-42
neutralización, 26-42
remoción de aceite, 26-42

remoción de grasa, 26-42
sustancias tóxicas, 26-42 a 26-43
procesamiento de las lechadas, 26-49 a 26-51
acondicionamiento químico, 26-50
acondicionamiento por temperatura, 26-50
centrifugación, 26-50
digestión aeróbica, 26-50
digestión anaeróbica, 26-50
espesamiento, 26-49
filtración a presión, 26-51
filtración al vacío, 26-50 a 26-51
filtros prensa de banda, 26-51
flotación, 26-49 a 26-50
lechos de arena, 26-51
objetivos del, 26-49
reciclaje y reutilización del agua, 26-51 a 26-52
segregación de los desperdicios, 26-51 a 26-52
tratamiento fisicoquímico (PCI), 26-49
tratamiento primario, 26-43 a 26-44
cámaras de arena, 26-43
mallas, 26-43
precipitación química, 26-43 a 26-41
sedimentación por gravedad, 26-43
tratamiento secundario, 26-44 a 26-49
conceptos biológicos, 26-44
contactores biológicos giratorios, 26-46 a 26-49
filtros de goteo, 26-46
lagunas, 26-46
Contaminación del aire:
en animales, 26-10
azufre, dióxido de, 9-53 a 9-54
azufre, óxidos de, a partir del carbón, 9-6
contaminantes de partícula, 26-10
contaminantes gaseosos característicos y su fuente, tabla, 26-5
dispersión en la chimenea, 26-21 a 26-26
cálculos de diseño, 26-26
efectos misceláneos, 26-26
efectos de los contaminantes del aire, 26-10 a 26-11
emisiones:
estimación de, 26-10
de óxido de nitrógeno, 9-54
de sistemas estacionarios de combustión, 26-4
emisiones gaseosas en la fuente, control de, 26-26 a 26-33
absorción, 26-26
adsorción, 26-27 a 26-29
combustión, 26-29 a 26-32
condensación, 26-32
emisiones de partículas en la fuente, control de, 26-33
estrategia de control de la fuente, 26-20 a 26-21
en humanos, 26-10
legislación, reglamentos y agencias en Estados Unidos, 26-11 a 26-20
Clean Air Act of 1970, 26-11
normas de contaminantes peligrosos en el aire, tabla, 26-19
prevención de deterioro significativo (PSD), 26-19
programa de intercambio controlado, 26-20
tabla, 26-12 a 26-17
en materiales, 26-10 a 26-11
medición de las emisiones, 26-33 a 26-40
opacidad, 26-39 a 26-40
metodología de muestreo, 26-35 a 26-39

selección del equipo de control, factores en la, 26-10 a 26-22
técnicas de control, tabla, 26-7 a 26-10
en vegetación, 26-10
Contaminación atmosférica, mediciones, 20-88
Contenido de humedad de equilibrio, 20-5
Contracción, pérdidas por, 5-38 a 5-40
Contribución, análisis de, 5-38 a 5-40
Control:
ajustable, 22-10, 22-116 a 22-117, 22-120 a 22-122
de alimentación directa, 22-4, 22-32
de entalpía (*véase* Fraccionamiento, control del)
grados de libertad, 22-107, 22-140 a 22-143
objetivos del, 22-137
punto de ajuste, 22-6
de retroalimentación (*véase* Control automático, sistemas de control de retroalimentación)
Control análisis del sistema de, 22-137 a 22-140
costos de instrumentación, 22-147 a 22-148
análisis de composición del proceso, 22-148
del control por computadora de la planta, 22-148
costos del control centralizado, tabla de, 22-148
montada localmente, 22-147
montada localmente, tabla de, 22-147
desarrollo del sistema, 22-137 a 22-138
características dinámicas, 22-137
características de las perturbaciones, 22-137
definición de objetivos, 22-137
desarrollo total, 22-138
determinación de restricciones, 22-137
diseño final, 22-138
factibilidad económica, 22-138
factibilidad técnica, 22-138
objetivos establecidos, 22-137
perturbaciones, fuente de las, 22-137
soluciones opcionales, 22-138
métodos para, 22-138 a 22-146
análisis de respuesta de frecuencia, 22-138 a 22-139
Bode, diagrama de, 22-138
composición de la mezcla reaccionante, 22-141 a 22-143
criterio de estabilidad de Bode, 22-139
flujo de masa, 22-141
modelos matemáticos, 22-143 a 22-146
periodo final, 22-139
prueba del pulso, 22-139 a 22-140
reactor químico, 22-140
reducción en los grados de libertad, 22-140
simulación, 22-143 a 22-146
simulación analógica, 22-144
simulación digital, 22-145
simulación híbrida, 22-146
variables, 22-142
variables de funcionamiento, 22-142
Control automático, sistemas de:
afinación del controlador, 22-21 a 22-29
afinación, encendido-apagado, 22-29
Bode, gráficas de:
basada en, 22-24 a 22-26
diagrama de, 22-25
respuesta de frecuencia, 22-23
criterios de funcionamiento, 22-22
frecuencia de oscilación, 22-23

integrales del
lugar geométi
margen, fase
método de la
método del úl
método de Zi
métodos anal
modelos con
modelos desc
Nyquist, diag
razón de deca
sobremodula
técnicas de b
técnicas para
tiempo de au
tiempo de res
alimentación dir
22-33 a 2
características d
analogías elé
flujo turbule
elemento de
elemento de
elemento de
elemento pro
elemento os
elemento de
elemento de
retraso de di
retrasos de o
circuito abierto,
circuito cerrado
compensación
control de alim
control en casc
control de ence
control de retro
control de e
control propor
diagramas de b
funciones de tr
combinació
definición d
Laplace, tra
restriccione
grados de libert
reducción d
modalidades, p
no lineal, 22-3
Control, centros d
consideracione
suposicione
estaciones de c
ajuste local
ajuste manu
ajuste del p
indicador d
indicador d
interruptor
funciones del c
presentación d

, 26-10 a 26-22
2-122
el)
co, sistemas de
18
2-148
2-148
37
a 22-139
-141 a 22-143
1

integrales del error, 22-23
lugar geométrico de la raíz, 22-26
margen, fase y ganancia, 22-23
método de la curva de reacción, 22-27
método del último periodo, 22-27
método de Ziegler-Nichols, 22-27
métodos analíticos, 22-28
modelos conocidos del proceso, basada en, 22-23 a 22-27
modelos desconocidos del proceso, basada en, 22-27 a 22-29
Nyquist, diagrama de, 22-26
razón de decaimiento, 22-22
sobremodulación, 22-22
técnicas de búsqueda, 22-28
técnicas para computadora analógica, 22-29
tiempo de aumento, 22-22
tiempo de respuesta, 22-22
alimentación directa-retroalimentación, combinado, 22-33 a 22-34
características del proceso, 22-8 a 22-12
analogías eléctricas, de flujo y calor, tabla, 22-9
flujo turbulento del líquido, 22-7
elemento de capacitancia, 22-9
elemento de retraso de primer orden, 22-9
elemento de retraso de segundo orden, 22-10
elemento proporcional, 22-8
elemento oscilatorio o cuadrático, 22-10
elemento de tiempo constante, 22-9
elemento de tiempo muerto, 22-12
retraso de distancia-velocidad, 22-12
retrasos de orden mayor, 22-12
circuito abierto, 22-35
circuito cerrado, 22-4
compensación de tiempo muerto, 22-33
control de alimentación directa, 22-4, 22-33
control en cascada, 22-31
control de encendido-apagado, 22-34
control de retroalimentación, 22-4, 22-13 a 22-21
control de encendido apagado, 22-14
control proporcional (*véase* Control proporcional)
diagramas de bloque, 22-4
funciones de transferencia, 22-6 a 22-8
combinación de, 22-7
definición de, 22-7
Laplace, transformaciones de, 22-7
restricciones, 22-7
grados de libertad, 22-29 a 22-30
reducción de, 22-30
modalidades, proporcional, 22-12
no lineal, 22-34
Control, centros de, 22-70 a 22-72
consideraciones de diseño, 22-72
suposiciones, 22-71
estaciones de control, 22-71
ajuste local a distancia, 22-72
ajuste manual, 22-72
ajuste del punto de ajuste, 22-72
indicador de señal, 22-72
indicador de la variable del proceso, 22-71
interruptor de transferencia automanual, 22-72
funciones del equipo, 22-71
presentación del sistema, 22-71
semigráfico, 22-71
totalmente gráfico, 22-71
requerimientos de información, 22-70
Control de la composición de la mezcla del reactor, 22-141
Control, modelos de, 22-116 a 22-117, 22-142
convencional computarizado, 22-116
entrada multivariable, 22-116
dinámico, 22-117
a régimen permanente, 22-117
Control del proceso:
control de la planta, 22-112
jerarquía del, 22-106
de las operaciones unitarias (*véase* Operaciones unitarias, control de las)
(*véase también* Control del proceso por computadora; Control, procesos unitarios)
Control del proceso por computadora:
control de la planta, 22-112 a 22-116
desarrollo del, 22-112 a 22-114
descomposición del, 22-114
de etileno, ejemplo, 22-116
optimización del, 22-115
equipo para el, 22-117 a 22-119
analógico, 22-118
digital, 22-118
requerimientos de hardware del, 22-118
software, 22-118
jerarquía del, 22-105
operaciones unitarias, 22-107 a 22-109
control adaptable, 22-109
ejemplos de las, 22-109
grados de libertad de las, 22-107
optimización de las, 22-108
(*véase también*, Operaciones unitarias, control de las)
proceso de polimerización, 22-111
procesos unitarios, 22-108 a 22-112
de los sistemas de fraccionamiento, 22-109
diagrama, 22-110
variable de funcionamiento, 22-107
Control proporcional, 22-13 a 22-21
más control de restauración (PI), 22-18
más control de restauración más control de velocidad (PID), 22-20 a 22-21
controladores de tres modalidades, 22-20 a 22-21
velocidad o acción de derivación, 22-20
procesos de primer orden, 22-15
más control de restauración (PI), 22-18 a 22-20
procesos de segundo orden, 22-16 a 22-18
más control de restauración (PI), 22-18 a 22-20
más control de restauración más control de velocidad, 22-20 a 22-21
sistemas de orden superior, 22-21
(*véase también* Controladores automáticos)
Control proporcional más control de velocidad más control de restauración
(*véanse* Control proporcional; Controladores automáticos)
Control proporcional más control de velocidad
(*véanse* Control proporcional; Controladores automáticos)
Control de la velocidad de producción en los reactores químicos, 22-128 a 22-129
Controlador proporcional-integral (PI)

(*véanse* Control proporcional; Controladores automáticos)
Controlador proporcional integral de derivada (PID)
(*véanse* Control proporcional; Controladores automáticos)
Controladores automáticos, 22-72 a 22-86
amplificadores neumáticos, 22-77 a 22-82
encendido-apagado, 22-78
de dos posiciones, 22-78
proporcional, 22-79
relevadores, 22-78
reposición proporcional, 22-79
tipo columna, 22-81 a 22-82
velocidad proporcional, 22-80 a 22-81
velocidad de reposición proporcional, 22-79
auto-operados, 22-73
encendido-apagado, 22-73
proporcional, 22-73
electrónicos, 22-73 a 22-76
amplificador de operación, 22-73
de dos posiciones, 22-74
entradas y salidas, 22-74
proporcional, 22-75
proporcional-integral, 22-75
proporcional-integral-diferencial, 22-76
lógica del sistema, 22-84 a 22-86
álgebra booleana, 22-84
control programable, 22-85
microprocesador, 22-82 a 22-84
ajuste de adaptación, 22-83
algoritmos, 22-83
aplicaciones de, 22-84
conceptos generales de, 22-82 a 22-83
entradas externas, 22-84
no lineales, ganancias de los procesos, 22-84
sobreamortiguado, 22-84
ventajas de los procesos no lineales, 22-84
Conversión:
de factores de viscosidad, 5-5
de mediciones de densidad, 1-19
de temperatura, 1-20
de viscosidades cinemáticas, 1-18
Conversión analógica-digital, 22-66
Conversión digital a analógica, 22-66
Conversiones:
comunes en orden alfabético, 1-15 a 1-17
de factores métricos, 1-13 a 1-14
de tablas especiales, 1-18
de unidades comunes U.S. a unidades SI, 1-4 a 1-12
[*véase también* (unidades) SI]
Conversión de grados Baumé, 1-19
Convertidores de torsión hidráulica, 24-53
Cooley-Tukey, algoritmo de, 2-77 a 2-78
Coordenadas cilíndricas, sistema de, 2-25
Coordenadas polares, sistema de, 2-19
Coordenadas de transición en sorción, 16-8
etapa semiintermitente, 16-50
etapa de un solo lote, 16-49
lechos en movimiento, 16-51
Coque, 9-8 a 9-9, 20-42
de alquitrán, 9-9
de alta temperatura, 9-8
de baja temperatura, 9-8
composición química del, tabla, 9-8
de fundición, 9-8
molienda del, 8-65
de petróleo, 9-9
propiedades físicas del, tabla, 9-7
regeneradores de horno de coque, 9-101 a 9-102
Cornell, ecuación de, 18-36
Corrosión:
abajo del aislamiento, 11-62
agrietamiento debido a corrosión por esfuerzo, 23-4
en tuberías, 6-42
por ataque a alta temperatura, 23-8
por ataque de hidrógeno, 23-5
biológica, 23-6
por cavitación, 23-5
por celda de concentración de oxígeno, 23-3
en chimeneas, 9-83
por choque, 23-5
por erosión, 23-5
por esfuerzo de cloruro, 11-61
en evaporadores, 11-34
por exfoliación en tuberías, 6-41
factores que afectan la, 23-7
agentes oxidantes, 23-6
concentración de la corriente, 23-7
impurezas, 23-7
pH de la solución, 23-6
películas, 23-7
temperatura, 23-7
velocidad, 23-7
por fatiga, 23-5
por fatiga del metal, 6-124
por fluidos:
materiales metálicos, 23-3
no metálicos, 23-3
por fragilización de hidrógeno en tuberías, 6-41
por fricción, 23-5
galvánica, 23-3 a 23-4, 23-13
efectos del área, 23-3 a 23-4
grafítica, 23-6
por grietas, 23-3
por desaleación, 23-6
por deszincificación, 23-6
en tuberías, 6-41
en intercambiadores de calor, 11-20
láminas tubulares revestidas, 11-20
tubos bimetálicos, 11-19
en intercambiadores enfriados por aire, 11-31
intercristalina en tuberías de acero inoxidable, 6-41
intergranular, 23-4
acero inoxidable austenítico, 23-4
en tuberías, 6-41
por límite del grano en tuberías, 6-41
por metal líquido, 23-5
métodos para combatir la, 23-8 a 23-10
alteración del medio ambiente, 23-8
diseño adecuado, 23-8
inhibidores, 23-9
protección anódica, 23-9
protección catódica, 23-9
recubrimientos, 23-9
revestimiento
revestimiento
selección de n
métodos de prue
por picaduras, 23
en recipientes a p
en sistemas de va
en tuberías, 6-41
velocidad de, 23-
Corrosión biológic
Corrosión debida a
Corrosión debida a
en tuberías, 6-41
Corrosión galvánic
series, 23-4
Corrosión por grie
Corrosión intercris
Corrosión intergra
en tuberías, 6-4
Corrosión en el lín
Corrosión, método
electroquímico,
método de pola
método de la re
prueba de labor
aereación de
aparatos par
composició
duración de
especímene
evaluación
impurezas,
limpieza ele
limpieza me
limpieza qu
método de l
pieza de pr
prueba de in
prueba del i
temperatur
de la so
variables, e
velocidad
volumen de
pruebas de agr
pruebas en la p
especímen
resultados
Corrosión por pi
Corrosión, resist
23-18
Corrosión por ro
Cortadores rotat
Cortinas de flam
Cosenos, ley de
Costo capitaliza
Costo(s):
base de, 25-7
control de, 25
para control p
del equipo, 2

revestimientos, 23-9
revestimientos orgánicos, 23-9
selección de materiales, 23-8
métodos de prueba (*véase* Corrosión, métodos de prueba de)
por picaduras, 23-3
en recipientes a presión, 6-121
en sistemas de vapor, 9-84 a 9-85
en tuberías, 6-41
velocidad de, 23-12
Corrosión biológica, 23-6
Corrosión debida al ataque por choque, 23-5
Corrosión debida a la, fragilización por hidrógeno, 23-5
en tuberías, 6-41
Corrosión galvánica, 23-3 a 23-4, 23-13
series, 23-4
Corrosión por grietas en tuberías, 6-40
Corrosión intercristalina en tuberías, 6-41
Corrosión intergranular, 23-4
en tuberías, 6-41
Corrosión en el límite del grano en tuberías, 6-41
Corrosión, métodos de prueba de, 23-10 a 23-16
electroquímico, 23-15
método de polarización lineal, 23-15
método de la resistencia eléctrica, 23-15
prueba de laboratorio, 23-10 a 23-13
aereación de la solución, 23-12
aparatos para, 23-11
composición de la solución de prueba, 23-11
duración de la prueba, 23-12
especímenes de limpieza, 23-12
evaluación de los resultados, 23-13
impurezas, 23-13
limpieza electrolítica, 23-12
limpieza mecánica, 23-12
limpieza química, 23-12
método de los especímenes de apoyo, 23-12
pieza de prueba, 23-10
prueba de inmersión total, 23-10
prueba del intervalo planeado, 23-13
temperatura, 23-13
de la solución, 23-12
variables, efecto de las, 23-13
velocidad de la solución, 23-13
volumen de la solución, 23-13
pruebas de agrietamiento en corrosión por esfuerzo, 23-16
pruebas en la planta, 23-14
especímenes para las pruebas, 23-14
resultados de las pruebas, 23-15
Corrosión por picaduras, 23-3
Corrosión, resistencia a la, datos para metales y aleaciones, 23-18 a 23-20
Corrosión por rozamiento, 23-5
Cortadores rotatorios, 8-32
Cortinas de flama, 20-32
Cosenos, ley de los, 2-28
Costo capitalizado, 25-12
Costo(s):
base de, 25-72
control de, 25-40 a 25-58
para control presupuestario, 25-63 a 25-67
del equipo, 25-72
de estimación del capital fijo, 25-70 a 25-86
de estimación de fabricación, 25-58 a 25-68
de dos productos principales, 25-60 a 25-61
de un producto principal, 25-59 a 25-60
de evaporadores, 11-47 a 11-48
de fabricación:
con base en el precio del producto, 25-62 a 25-63
directos, 25-61
indirectos, 25-61
de intercambiadores de calor, 11-21
de intercambiadores enfriados por aire, 11-31
de variancia de materiales, 25-64
de variancias de costos indirectos, 25-66
de variancias de mano de obra directa, 25-66
Costos anuales, 25-5 a 25-7, 25-12
Costos de arranque, 25-81 a 25-82
Costos de capital, 25-7, 25-49 a 25-51
Costos del capital de trabajo, 25-7
Costos de electricidad, estimaciones, 25-80
Cottrell, precipitadores, 20-129
Cox, gráfica de, 13-73
Cramer, regla de, 2-19
Craqueo catalítico en lechos fluidizados, 20-79 a 20-80
Cribado, 21-14 a 21-21
alimentación, 21-27
capacidad, 21-27
consumo de agua, 21-28
costo del, 21-28
definición del, 21-14
equipo para, 21-15 a 21-19
requerimientos de potencia, 21-28
ruido, 21-20
seguridad, 21-20
variables en el, 21-18
Cribas, 21-3
agitador, 21-20
definición de las, 21-26
electrostáticas, 21-47
escala de cribado, 21-14
tabla, 21-16
de prueba, 21-20
tipos de, 21-27
Cribas moleculares como adsorbentes, 16-5
Criogenia:
aspectos de seguridad en, 12-63
flamabilidad y riesgos de explosión, 12-63
riesgos de gases a alta presión, 12-63
riesgos de los materiales y la construcción, 12-63
riesgos psicológicos, 12-63
licuefacción de gases, 12-52
procesos, 12-51 a 12-63
selección del material a temperaturas bajas, 12-51 a 12-52
Criogenios, almacenamiento de, 12-60 a 12-63
Criptón, propiedades termodinámicas del, 3-243 a 3-244
Cristal(es):
cálculo del balance de la población, ecuaciones comunes, 19-34
crecimiento de, 19-31, 19-33 a 19-34
velocidad de, 19-31
definición de, 19-29
formación de, 19-31
geometría de, 19-31

nucleación de, 19-31, 19-33 a 19-34
y crecimiento del, 19-34 a 19-37
comportamiento de Bujacian, 19-33
Cristalización, 17-3 a 17-13
balance de la población en la, 19-34
coeficiente de variación, 19-33
en columna, 17-7 a 17-13
cristalizador con alimentación al centro, 17-7 a 17-12
cristalizador con alimentación en el extremo, 17-7 a 17-13
concepto del coeficiente de distribución, 17-4
por congelación normal, 17-4 a 17-5
exudación, 17-5
separación mediante, 17-4
ecuaciones cinéticas para la, 19-36
efectos del calor en la, 19-36
equipo para la (*véase* Cristalizadores)
definición de, 17-3
diagramas de fase para la, 19-28 a 19-29
fraccionaria, 19-29 a 19-30
por fusión, definición de la, 17-3
fusión por zonas, 17-5 a 17-6
ley delta L, 19-33
principios de la, 19-28 a 19-38
pureza del producto, 19-32
rendimiento en la, 19-29
solubilidad, 19-28, a 19-29
por solución, 19-28 a 19-45
Cristalizadores, 11-43, 19-39 a 19-43
con alimentación central, 17-6 a 17-11
con alimentación en el extremo, 17-6, 17-11 a 17-13
Armstrong, 19-42
costo de los, 19-44
con enfriamiento superficial, 19-40 a 19-41
especificación de los, 19-43
de evaporación con circulación forzada, 19-39
de magma circulante, 19-39
de magma coniesférico, 19-39
operación de los, 19-43 a 19-44
de Oslo, 19-41 a 19-42
con enfriamiento superficial, 19-42
con raspadores de superficie, 19-42
de tubería doble, 19-42
de refrigeración por contacto directo, 19-41
con remoción de finos, 19-37 a 19-39
de suspensión clasificada, 19-41 a 19-42
de suspensión mixta:
con remoción del producto clasificado, 19-41
con remoción del producto mezclado, 19-39
de tanque, 19-42 a 19-43
agitado, 19-42 a 19-43
estático, 19-42
tipo reacción, 19-41
de tubo de tiro, 19-40
con placa desviadora, 19-39 a 19-40
Votator, 19-42
Criterios de funcionamiento de los controladores, 22-22
Críticas, constantes, 3-135 a 3-136
predicción de las, 3-310 a 3-312
Cromatografía:
curvas gaussianas en, 16-42
diseño de separaciones de trazas, 16-43
método de momentos, 16-43
modalidad masiva, 16-41
modalidad de trazas, 16-41
como una operación de sorción, 16-6
separación por, 16-6
Cromatografía de gases, 4-19
Crout, reducción de, 2-63
Cuadratura, 2-45
Cuadrilátero, área del, 2-12
Cubiertas para motores, 24-10
Cubilotes, 20-27 a 20-28
para ladrillos, 20-28
rotatorios con calor directo, 20-38
para calcinación, 20-41
datos de costos, 20-43 a 20-44
eficiencia térmica, 20-43
motores para, 20-43
segregación de tamaño, 20-43
sistemas especiales de alimentación, 20-39
de estufa, 20-28
de tiro ascendente, 20-28
de tiro descendente, 20-28
túnel de cerámica, 20-33
Cultivos, procesos de, 27-17
Cunningham, corrección de, 20-90
Curtis, etapa de, para turbinas de vapor, 24-23
Curva de ruptura en la sorción, 16-18 a 16-44
función J, 16-31 a 16-32
patrón constante, 16-22
transiciones de los patrones proporcionales, 16-18
Curvas características:
de bombas, 6-8 a 6-13
de compresores, 6-26
gráfica, 6-26
de sopladores, gráfica, 6-25
de ventilares, gráfica, 6-26
Curvas de distribución, modelos matemáticos para las, 25-24 a 25-26
Curvas de espacio, 2-25
Curvas de flujo de efectivo, 25-13 a 25-15

Chebyshev, ecuación de, 2-48
Chebyshev, método de, 12-14
Chézy, fórmula de, 5-31
Chichelli-Bonilla, correlación, 10-24
Chilton-Colburn, analogía de, 14-15
Chilton-Colburn, factor J de, 14-12
Chimenea, diseño de la, cálculos para el, 26-26
Chimeneas, 9-83
en condiciones corrosivas, 9-83
temperaturas de salida del gas, gráfica, 9-83
de tiro, 9-81 a 9-84
Chorros:
circulares con entrada redondeada, 5-24
coaxiales, 5-24 a 5-25
comportamiento de los, 5-24
dinámica del fluido, 5-23 a 5-25
gradientes de densidad, 5-25
impacto de los, sobre una placa, 5-23
laminares, 5-25
rectangulares, 5
de rendija, 5-25
turbulentos, 5-2
Chumaceras, 6-36

D-O SiphonSizer,
Damköhler, núme
Darcy, ecuación d
Decano, propieda
Decantación cont
aplicación de la
bombas de sob
bombeo de sub
diseño del diag
eficiencias de
equipo para, 1
instrumentació
velocidad unif
Decantadores, 21
Decoloración me
Decrepitación té
Delaval, toberas,
Delaval, extracto
Delphic, método
DeMoivre, fórm
Densidad:
del cristal, 16
de los elemen
de gases en co
en húmedo,
de líquidos, c
masiva de pa
de materiales
de soluciones
inorgánic
orgánicas,
de sustancias
del vapor, 3-
Densidad, conv
Densidad de co
Depósitos de al
Depósitos oval
Depreciación,
DePriester, grá
Depurador de g
Depuradores:
aumentados
de ciclón, 20
con condens
eficiencia de
en húmedo,
de lecho em
de lecho de
de lecho mó
mecánicos,
de partícula,
para polvo,
potencia de
de rocío, 20
de rocío aut

  rectangulares, 5-24
  de rendija, 5-25
  turbulentos, 5-24
Chumaceras, 6-36

D-O SiphonSizer, 21-25
Damköhler, número de, 4-10
Darcy, ecuación de, 5-26
Decano, propiedades termodinámicas del, 3-229
Decantación continua a contracorriente, 19-70 a 19-72
  aplicación de la, 19-70
  bombas de sobreflujo, 19-70
  bombeo de subflujo, 19-70
  diseño del diagrama de flujo, 19-70
  eficiencias de mezclado entre etapas, 19-70 a 19-71
  equipo para, 19-70
  instrumentación, 19-71
  velocidad uniforme de alimentación, 19-70
Decantadores, 21-70
Decoloración mediante carbón activado, 16-35
Decrepitación térmica, 20-75
Delaval, toberas, 5-35
Delaval, extractor, 21-90
Delphic, método, 25-24
DeMoivre, fórmula de, 2-10
Densidad:
  del cristal, 16-9
  de los elementos, 3-119
  de gases en condiciones estándar, 3-98
  en húmedo, 16-9
  de líquidos, cálculo de la, 3-370
  masiva de partículas, 21-4
  de materiales diversos, 3-118 a 3-119
  de soluciones acuosas:
    inorgánicas, 3-99 a 3-108
    orgánicas, 3-109 a 3-117
  de sustancias puras, 3-95 a 3-98
  del vapor, 3-312 a 3-316
Densidad, conversión de las mediciones de, 1-19
Densidad de corriente, 17-39
Depósitos de almacenamiento (*véase* Almacenamiento de sólidos)
Depósitos ovalados para ácidos, 6-17
Depreciación, 25-7 a 25-9
DePriester, gráfica de, 13-17
Depurador de gas de una sola placa perforada, 18-86
Depuradores:
  aumentados eléctricamente, 20-110
  de ciclón, 20-107
  con condensación de agua, 20-104
  eficiencia de los, 20-103
  en húmedo, 18-88 a 18-89
  de lecho empacado, 20-105
  de lecho de fibra, 20-108
  de lecho móvil, 20-107
  mecánicos, 20-108 a 20-109
  de partícula, 20-101 a 20-110
  para polvo, 20-90, 20-101 a 20-110
  potencia de contactante, 20-101 a 20-102
  de rocío, 20-107
  de rocío autoinducido, 20-107 a 20-108
  venturi, 18-89 a 18-90, 20-107
Depuradores en húmedo, 18-88 a 18-89
Derivación, 2-43
  de integrales indefinidas, 2-35
  numérica, 2-69
Derivación numérica, 2-69 a 2-70
Derivadas de funciones, 2-30 a 2-31
  parciales, 2-32
Derramamiento del vórtice, 5-63 a 5-64
  fuerza, 5-63 a 5-64
  frecuencia, 5-63
Desagüe, tuberías de, 5-49
  dos fases, 5-49
Descartes, regla de, 2-65
  de signos, 2-18
Descontaminación, factor de, 20-92
Desflemación, definición de la, 18-3
Desgaste del molino debido a la molienda, 8-11
Deshumidificación, definición de la, 18-3
Desigualdad aritmético-geométrica, 2-11
Desigualdades, 2-9
  algebraicas, 2-11
Desionización con lecho mixto, 16-45
Deslamador de tazón, 21-22
Deslizamiento, flujo de, 5-36
  corrección del, 20-90
Deslizamiento del motor, 24-4
Deslizamiento, velocidad de, 21-76
Desorción:
  definición de la, 16-5
  frontal, 16-48
  por oscilaciones de temperatura y presión, 16-40
Desperdicios, colocación de, mediante lechos fluidizados, 20-83
Desperdicios peligrosos:
  estándares de contaminación de aire, tabla, 26-18
  procesamiento de los, 26-68
  recipientes para el almacenamiento de los, 26-59 a 26-60
  relleno del terreno para los, 26-79 a 26-80
  transferencia y transporte de los, 26-67
Desperdicios, procesamiento de, 21-50 a 21-51
Desperdicios de sólidos:
  acciones y efectos de la remoción del, tabla, 26-82
  almacenamiento en el sitio, 26-59 a 26-60
  cantidades de, 26-58 a 26-59
  colocación final de, 26-73 a 26-83
    conformación del terreno, 26-80 a 26-81
    colocación en el océano, 26-83
    inyección de pozo profundo, 26-81 a 26-83
    relleno del terreno, 26-74 a 26-80
  como combustibles, 9-7 a 9-9
    en generadores de vapor, tabla, 9-79
  fuentes de desperdicio industrial, tabla, 26-55
  generación de, 26-54 a 26-59
  leyes, reglamentos y oficinas de EE UU, 26-53 a 26-54
  manejo en el sitio, 26-59
  planeación para la colocación de, 26-83
  recolección de, 26-60 a 26-65
    requerimientos de mano de obra, 26-64 a 26-65
    rutas, 26-65
    servicios, 26-61
    tipos de sistemas, 26-61

vehículos, 26-64
recuperación de los materiales, 26-68 a 26-73
productos de conversión biológica, 26-71
recuperación de los productos de conversión química, 26-72
procesamiento de, 26-67 a 26-71
de desperdicios peligrosos, 26-68 a 26-69
en el sitio, 26-60
técnicas para, 26-67 a 26-68
procesamiento en el sitio, 26-60
propiedades de, 26-56 a 26-58
sistemas de recuperación de energía, 26-73
tipos de, 26-54
transferencia y transporte de, 26-66 a 26-67
de desperdicios peligrosos, 26-67
estaciones, 26-66
método de, 26-66 a 26-67
ubicación de las estaciones de transferencia, 26-67
Desperdicios, tratamiento de, 27-17
Destilación, 13-1 a 13-104
algoritmo de matriz tridiagonal, 13-48 a 13-53
azeotrópica, 13-61 a 13-76
diseño de la columna, 13-75 a 13-76
selección del atrapador, 13-74 a 13-75
trayectoria de destilación, 13-62
binaria, 13-28 a 13-36
en columnas empacadas, 13-103 a 13-104, 18-44
compleja, 13-6 a 13-9
en columna múltiple, 13-8
con reflujo y evaporación secundarios, 13-8
continua, 13-5 a 13-10
modelo de la etapa de equilibrio, 13-6
principios generales de la, 13-5
datos termodinámicos para, 13-10 a 13-19
datos de equilibrio de fase, 13-15 a 13-17
relaciones de equilibrio vapor líquido, 13-17 a 13-19
definición de la, 18-3
DePriester, gráficas de, 13-17
nomograma, 13-17
dinámica (transitoria), 13-97 a 13-103
binaria ideal, 13-99
con evaporación de equilibrio instantáneo, 13-97 a 13-98
multicomponente, 13-100 a 13-103
con respuesta de circuito cerrado, 13-98
factores de absorción, gráfica, 13-42
factores de agotamiento en, gráfica, 13-42
eficiencia de la bandeja, 13-6
eficiencia de la etapa en, 13-6
extractiva, 13-56 a 13-61
diseño de la, 13-59
selección del solvente para la, 13-58
intermitente, 13-88 a 13-97
azeotrópica, 13-97
cálculos binarios para, 13-89 a 13-90
Distéfano, ecuaciones de, 13-93 a 13-95
efecto de la retención de la columna, 13-92
métodos de diseño por computadora para la, 13-92 a 13-96
con rectificación del lote, 13-91
relación de reflujo mínimo, 13-90
volatilidad relativa, 13-88
en laboratorio, 13-76 a 13-80
ASTM, 13-76 a 13-78
mediciones de eficiencia, 18-15 a 18-16
en línea *q*, 13-30
métodos gráficos para, 13-28 a 13-37
McCabe-Thiele (*véase* McCabe-Thiele, método de)
multicomponente, 13-33 a 13-56
Fenske-Underwood-Gilliland, método de, 13-39 a 13-41
Kremser, método de, 13-41 a 13-43
métodos abreviados, 13-37 a 13-41
métodos rigurosos, 13-44 a 13-56
Smith-Brinkley, método de, 13-37 a 13-38
del petróleo, 13-76 a 13-87
aplicaciones de la, 13-79 a 13-82
caracterización de la, 13-76 a 13-80
diseño de la, 13-81 a 13-87
principios generales de la, 13-5
procedimientos de corrección simultánea para, 13-53 a 13-61
relación interna de reflujo, 13-30
relación de reflujo externo, 13-30
relaciones de equilibrio vapor líquido, 13-17 a 13-19
Thiele-Geddes, método de, 13-44 a 13-47
en torres de platos (*véase* Torres de platos)
Destilación azeotrópica, 13-61 a 13-76
(*véase también* Destilación)
Destilación, eficiencia de las etapas, 13-6
Desublimación, definición de la, 19-14
(*véase también* Sublimación)
Desviación estándar, 2-86
Deszincificación, 23-5
en tuberías, 6-41
Determinantes, 2-18 a 2-19
Deuterio, óxido de, propiedades termodinámicas del, 3-230
Deuterio, propiedades termodinámicas del, 3-299
Deutsch, ecuación de, 20-127
Dewar en aislamiento, recipiente de, 11-60 a 11-61
Diafragma, compresores de, 6-32
Diafragma, válvulas con motor de (*véase* Válvulas de control, cuerpos de las)
Diagrama(s) de fase:
equilibrio de la fase ternaria, 15-5
sistemas gas sólido, 20-67
sistemas de multicomponentes, 15-6
de triángulo equilátero, 15-5
Diafragmas, medición de presión mediante, 22-40
Diálisis (*véase* Procesos de membrana, diálisis)
Diámetro aerodinámico, 20-87, 20-89
Diámetro económico de la tubería, 5-40
Diámetro hidráulico, 5-6
Dielectroforesis, 17-49 a 17-55
aplicaciones de la, 17-49 a 17-50
dielectrofiltración, 17-51 a 17-53
distribución de partícula, 17-54
Difenil, propiedades termodinámicas del, 3-231
Diferenciales, 2-31
Difusión:
de catálisis, 4-43
de Knudsen, 16-27
de líquidos a través de sólidos, 20-10
de partícula, 16-26 a 16-27
de poro, 16-27 a 16-28
de vapor a través de sólidos, 20-10
(*véase también* Absorción de gas)
Difusión, coefici
para gases, 3-3
para líquidos, 3
Difusión de poro
Difusión, proceso
gaseosa, 17-73
diseño de la
de masa, 17-78
por presión, 17
de mezclas
de mezclas
proceso de
térmica, 17
Difusividades:
en flujo capila
en intercambia
en líquidos, 3-
de pares de ga
en sistemas de
(*véase tambié*
Diodos emisores
Discontinuidade
Discos:
para evaporad
para molinos
Discos centrífug
Diseño:
absorción e in
secuencias
del equipo de
del equipo de
(*véanse ta*
Interc
de los sistema
diseño
de torres emp
de torres de p
Dispersión axial
Dispersión, mol
Dispersiones:
con asentami
uniformid
axiales, 21-7
estables, 18-9
en fase líquid
de gas en líqu
aereadore
área interf
caracterís
contactor
difusores
métodos
objetivos
retención
selección
para siste
sistemas
tamaño d
toberas p
transferen
inestables, 1

Difusión, coeficientes de, 3-333 a 3-336
para gases, 3-333
para líquidos, 3-334 a 3-335
Difusión de poro en partículas sorbentes, 16-27 a 16-28
Difusión, procesos de separación por, 17-72 a 17-79
gaseosa, 17-73 a 17-75
diseño de la etapa, 17-74
de masa, 17-78 a 17-79
por presión, 17-77 a 17-78
de mezclas gaseosas, 17-75
de mezclas líquidas, 17-75
proceso de la centrífuga de gas, 17-76
térmica, 17-75 a 17-76
Difusividades:
en flujo capilar, 20-16
en intercambiadores de iones, 16-27
en líquidos, 3-303 a 3-304
de pares de gases, 3-301 a 3-302
en sistemas de absorción, 16-26 a 16-27
(*véase también* Transferencia de masa)
Diodos emisores de luz, 22-69
Discontinuidades de funciones, 2-30
Discos:
para evaporadores, 11-39
para molinos de frotamiento, 8-50 a 8-51
Discos centrífugos, 20-63
Diseño:
absorción e intercambio iónico, 16-8 a 16-9
secuencias para los cálculos, 16-8
del equipo de agitación, 19-11 a 19-12
del equipo de transferencia de calor, 10-24 a 10-25
(*véanse también* Condensadores: Evaporadores; Intercambiadores de calor; Recalentadores)
de los sistemas de absorción de gas (*véase* Absorción de gas, diseño del sistema)
de torres empacadas (*véase* Torres empacadas)
de torres de platos (*véase* Torres de platos)
Dispersión axial, 16-29 a 16-30
Dispersión, molinos de, 8-51 a 8-52
Dispersiones:
con asentamiento líquido líquido, 21-69
uniformidad de las, 21-65 a 21-67
axiales, 21-76 a 21-79
estables, 18-94
en fase líquida líquida, 21-64
de gas en líquido, 18-61 a 18-77
aereadores de choque, 18-70
área interfacial, 18-74
características de las, 18-65 a 18-66
contactores en las líneas de tubería, 18-70
difusores de chorro, 18-70 a 18-71
métodos de las, 18-66
objetivos de las, 18-62
retención de gas, 18-74 a 18-75
selección del equipo para las, 18-72 a 18-74
para sistemas en cascada, 18-71
sistemas de frotamiento de fluidos, 18-70
tamaño de la burbuja, 18-74
toberas para las, 18-70 a 18-71
transferencia de masa de las, 18-73 a 18-74
inestables, 18-94
de líquido en gas, 18-52 a 18-61
con arrastre, 18-52
(*véase también* Arrastre)
equipo para las, 18-54
neblinas, 18-52
rocíos, 18-52
en nieblas, 18-78
en torres, 21-77
Dispersoides gaseosos, 20-87
(*véase también* Partículas)
Dispositivos de anaquel al vacío para transferencia de calor, 11-58
Dispositivos elevadores para transferencia de calor, 11-57
Dispositivos de gravedad con ayuda mecánica, 21-83
Dispositivos de mezclado para sólido con cono doble, 11-56
Distancia entre dos puntos, 2-19 a 2-24
Distéfano, ecuaciones de, 13-94
Distribución:
coeficiente de, 15-5
de datos, 2-90 a 2-91
de F, 1-25
del fluido, 5-54 a 5-56
de *ji* cuadrada, 1-24
del tiempo de residencia, 5-25
de velocidad, 5-25
Distribuidores de flujo, 5-54 a 5-56
con aletas rotatorias, 5-55 a 5-56
lechos de sólidos, 5-56
tipo ranura, 5-55
tubos perforados, 5-54 a 5-55
placas y pantallas, 5-41 a 5-56
Distribución *ji* cuadrada, 2-91
División, 2-15
Donnan, elevación de, 16-16
Doolittle, fórmula de, 6-115
Duhem, teorema de, 4-86
Dukler, teoría de, 10-23
contaminantes, 26-32
depuración de la, 20-104
mecanismos de, 10-20
número de, 2-123
Duncan, prueba de intervalo múltiple de, 2-106 a 2-108
Dureza de metales y aleaciones, 23-47 a 23-54
Dyna Whirlpool, separador (DWP), 21-36

Ebullición, 10-23 a 10-24
de depósito, 10-23
mecanismo de la, 10-23
de nucleación, 10-23
Ebullición nucleada en generadores de vapor, 9-73 a 9-76
desviación de la, 9-73
Ecuación de la onda, 2-9
Ecuación del punto de burbujeo, 13-26
Ecuación del punto de rocío, 13-26
Ecuación UNIQUAC, 4-85
Ecuación virial de estado, 4-76, 4-80
Benedict-Webb-Rubin, 13-18
Gmehling, Liu y Prausnitz, 13-20
Margules, 13-20
Soave, 13-19
van Laar, 13-21
Wilson, 13-21

Ecuaciones:
de estado, 3-316 a 3-318
de Euler (*véase* Euler, ecuación de)
diferenciales (*véase* Ecuaciones diferenciales)
de diferencias (*véase* Ecuaciones de diferenciales)
integrales (*véase* Ecuaciones integrales)
de Margules, 4-83
de Benedict-Webb-Rubin (BWR), 4-76, 4-82
cúbica, 4-87
definición de las, 4-60
de dos parámetros, 3-316
de los gases ideales, 4-62
de Pitzer, 4-77 a 4-78
de Redlich-Kwong, 4-82
virial (*véase* Ecuación virial de estado)
Teoría de las, 2-16
UNIQUAC, 4-84
de Van Laar, 4-83
de Wilson, 4-83
Ecuaciones cuadráticas, 2-16
Ecuaciones a la cuarta potencia, 2-17
Ecuaciones cúbicas, 2-17
Ecuaciones diferenciales, 2-45 a 2-51
especiales, 2-47 a 2-48
Bessel, ecuación de, 2-47
Chebyshev, ecuación de, 2-48
Euler, ecuación de, 2-47
Hermite, ecuación de, 2-48
Laguerre, ecuación de, 2-48
Legendre, ecuación de, 2-48
ordinarias, 2-45 a 2-47
cuadratura, 2-46
ecuaciones exactas, 2-45
ecuaciones homogéneas, 2-46
ecuaciones lineales, 2-45
lineales con coeficientes constantes, 2-46
lineales no homogéneas, 2-46
de orden mayor, 2-46
de primer orden, 2-45 a 2-46
de segundo orden, 2-46
resolubles para dy/dx, 2-46
resolubles para x, 2-46
resolubles para y, 2-46
soluciones numéricas, 2-71
parciales, 2-48
lineales de primer orden, 2-49
de órdenes mayores, 2-48 a 2-50
soluciones numéricas, 2-73 a 2-75
Ecuaciones de diferencias, 2-51 a 2-53
finitas, 2-51 a 2-53
lineales, 2-52
no lineales, Riccati, 2-53
Ecuaciones integrales, 2-53 a 2-54
métodos de solución, 2-54
Picard, método de, 2-53
relación con las ecuaciones diferenciales, 2-53
tipo Fredholm, 2-53
tipo Volterra, 2-53
Volterra, ecuación de, 2-54
Ecuaciones lineales, 2-16
soluciones numéricas a las, 2-65

Ecuaciones paramétricas, 2-24
Ecuaciones de polinomios de *n*-ésimo grado, 2-16
Ecuaciones de velocidad de la reacción química:
Arrhenius, ecuaciones de, 4-3
constante de velocidad, 4-3 a 4-22
derivación de las, 4-20
método diferencial, 4-21
método integral, 4-21
método empírico, 4-22
para fluido-sólido, tabla, 4-9
a partir de datos experimentales, 4-11
mediante análisis estadístico empírico, 4-17
con reactor a escala reducida, 4-17
por la verificación del mecanismo, 4-18
reacciones catalizadas con sólidos, tabla, 4-16
para reacciones de estado sólido, 4-12
Eductores (*véase* Chorros; Eyectores)
Efecto Hall, sensores, transductores del, 22-65
Eficiencia:
barrera de, 17-74
de blanco, 20-93
de bombas, 6-13, 6-17
de las calderas industriales, 9-84
de las cámaras de asentamiento por gravedad, 20-93
de los colectores de partículas, 18-78 a 18-79
de colección de polvo, 20-91
corrección de corte, 17-75
de depuradores, 20-103
evaluación del punto de, 18-16
de los filtros de aire, 20-119
de los filtros de bolsas, 20-114 a 20-116
de hornos rotatorios, 20-42
del impacto por inercia, 18-91
de mezclado, 17-74 a 17-75
de pantallas, 21-19
de los precipitadores eléctricos, 20-126
de los procesos termodinámicos, 4-98 a 4-100
de retropresión, 17-74
de separación de los ciclones, gráfica, 20-97
de los separadores de malla, 18-86 a 18-87
de sistemas de cogeneración, 9-94 a 9-97
para torres de platos, 18-15 a 18-20
de los ventiladores, 6-23
Elastómeros como materiales de construcción (*véase* Hule)
Electrodiálisis, 17-39 a 17-49
aplicaciones de la, 17-49
consumo de potencia, 17-45
datos de operación y diseño, tabla, 17-49
equipo para, 17-45
incrustación y ensuciamiento de la membrana, 17-48 a 17-49
membranas selectivas de iones, propiedades de las, 17-41 a 17-44
Electrodos de los precipitadores eléctricos, 20-132
Electrofiltración con flujo cruzado, 17-59 a 17-61
transferencia de masa en la, 17-59 a 17-61
Electroforesis, 17-40 a 17-41
a contracorriente, 17-40
definición de la, 17-50
electrodecantación (electroconvección), 17-40
electrodiálisis, 17-40
flujo libre, 17-41
lecho empacado, 17-41

membrana, 17-
modalidad de c
zona, 17-41
zona de flujo c
Electroquímica:
actividad medi
celdas electroq
carga, 4-93
celdas elect
celdas galv
electrodo d
electrodos,
electrolitos
equilibrio e
termodinár
voltaje, 4-9
estándar de po
Faraday, cons
fuerza electro
reacción glob
soluciones ele
voltaje a circu
voltaje termin
Elementos:
calores:
de evapora
de fusión,
calores espec
constantes cri
densidades d
propiedades f
Elementos de c
actuadores de
bombas de sa
unidades mat
(*véase tambi*
Elevación de ai
Elevación del p
Elevaciones de
Elevadores de c
cangil
Elevadores neu
característica
guías para la
principios de
(*véase tambi*
Eliminación ga
Eliminadores d
Elipse, área de
Elipsoide, 2-25
volumen del
Elongación de
Elución de cro
Embalaje, oper
bastidor:
de almac
de condu
de entrad
de flujo,
de pasill
bolsas de en

membrana, 17-40
modalidad de operación, 17-40
zona, 17-41
zona de flujo continuo, 17-40 a 17-41
Electroquímica:
actividad media iónica, 4-97
celdas electroquímicas, 4-93 a 4-98
carga, 4-93
celdas electrolíticas, 4-93
celdas galvánicas, 4-93, 4-96
electrodo de referencia, 4-96
electrodos, 4-93
electrolitos, 4-93
equilibrio en las, 4-95
termodinámica de las, 4-94
voltaje, 4-94
estándar de potencial del electrodo, 4-95
Faraday, constante de, 4-93
fuerza electromotriz, 4-94
reacción global de la celda, 4-93
soluciones electrolíticas, termodinámica de las, 4-97
voltaje a circuito abierto, 4-93
voltaje terminal, 4-93
Elementos:
calores:
de evaporación, 3-144 a 3-146
de fusión, 3-144 a 3-146
calores específicos, 3-155 a 3-162
constantes críticas, 3-135 a 3-136
densidades de, 3-119
propiedades físicas de los, 3-7 a 3-27
Elementos de control final:
actuadores de potencia eléctrica variable, 22-96
bombas de salida variable, 22-96
unidades matrices de velocidad variable, 22-96
(*véase también* Válvulas de control)
Elevación de aire, 6-17
Elevación del punto de ebullición, 11-39
Elevaciones de gas, 5-46 a 5-47
Elevadores de cangilones (*véase* Transportadores, elevadores de cangilones)
Elevadores neumáticos, 22-95
características dinámicas de, 22-95
guías para la aplicación de, 22-95
principios de operación de, 22-95
(*véase también* Actuadores, de posición lineal)
Eliminación gaussiana en matrices, 2-59 a 2-61
Eliminadores de neblinas de fibra, 18-93 a 18-94
Elipse, área de la, 2-13
Elipsoide, 2-25
volumen del, 2-13
Elongación de metales y aleaciones, 23-47 a 23-54
Elución de cromatografía, 16-42
Embalaje, operaciones de, 7-49 a 7-54
bastidor:
de almacenamiento, 7-59
de conducción en vehículos, 7-62
de entrada en vehículos, 7-62
de flujo, 7-62
de pasillo, 7-60
bolsas de embalaje, 7-53
cierre de bolsas, 7-53
elevadores, 7-58
embalaje compacto, 7-53
embalajes compactos, atados y envolturas, 7-54
empacadoras centrífugas tipo banda, 7-52
entarimadores automáticos, 7-58
entarimados, 7-65
equipo para:
llenado de bolsas con boca abierta, 7-52
llenado de bolsas de válvula, 7-52
llenado y pesado, 7-52
llenado de cajas, bolsas y sacos pequeños, 7-54
llenadoras:
de bolsas por fluidización, 7-53
de bolsas tipo sinfín, 7-53
de bolsas tipo núcleo, 7-53
tipo gravedad, 7-53
tipo hélice, 7-52
llenado de tambores y cajas para artículos a granel, 7-53
marcado y etiquetado del embalaje, 7-54
pesado, 7-52
verificación del, 7-51
sellado:
de cajas, 7-53
forma de llenado, 7-53
velocidad instantánea, 7-52
Embalajes:
datos de funcionamiento, tabla, 7-49
de líquidos, 7-43 a 7-45
diseño de la estación de trabajo, 7-43
embalajes pequeños para líquidos, 7-43
llenado y pesado de los tambores, 7-43
línea de llenado, 7-43
pesado, 7-43
recipientes para, 7-45
reglamentos de seguridad, 7-45
de sólidos, 7-45 a 7-49
bolsas de embalaje, 7-48
bolsas de papel de capas múltiples, 7-45 a 7-48
bolsitas y sacos pequeños, 7-48
cajas, 7-48 a 7-49
formas de llenado y sellado, 7-48
recipientes masivos intermedios, flexibles, 7-48
rígidos, 7-48
recipientes recubiertos, 7-48
tambores, 7-49
Emisiones al aire, estándar de (*véase* Contaminación del aire)
Emisividad de superficies diversas, tabla, 10-53 a 10-54
Empaque, materiales de, propiedades físicas de los, 23-66
Empaque(s), 6-48, 6-53
Empaques:
en ejes giratorios, 6-37
aplicaciones de los, 6-37
y material de sello, propiedades de los, 23-66
para torres, 5-62
caída de presión debida al, 5-62
para varillas de émbolos, 6-32
Emulsiones, 21-69
End-Shak, agitador de malla de prueba, 21-21
Endurecimiento por calor, 8-78
Energía de activación, 4-3

Energía, balance de, en dinámica de fluidos, 5-22 a 5-23
Energía, evaluación de la, con calor reciclado, 25-68
Energía interna, 4-59
Energía, leyes de, para molienda, 8-13
Energía libre de formación, 3-177 a 3-194
  de Gibbs, 3-322
Enfriadores, 11-25
  atmosféricos, 11-24
  en cascada, 11-24
  definición de los, 11-3
  de gránulo, 20-55
Enfriadores de ajuste, 11-30
Enfriadores atmosféricos, 11-24
Enfriadores en cascada, 11-24
Enfriamiento por evaporación, 12-13 a 12-25
  en intercambiadores enfriados por aire, 11-30
Engler, destilación de, 13-76 a 13-78
Enlaces intermoleculares, fuerzas de, 8-69
Ensuciamiento, 10-44 a 10-45
  asintótico, 10-44
  coeficientes de transferencia de calor para el, tabla, 10-46
  control del, 10-45
  en evaporadores, 11-34
  en haces de tubos, 11-19
  remoción de depósitos, 10-45
  resistencia debida al, 10-45
Entalpías, de evaporación, 3-309 a 3-322
Equilibrio(s):
  de adsorción e intercambio de iones:
    acción de masa, 16-15
    bilineal, 16-13
    desfavorable, efecto del, 16-18
    de Donnan, 16-17
    expresión trinomial, 16-14 a 16-20
    factor de separación constante, 16-16 a 16-17
    de Freundlich, 16-14
    de Langmuir, 16-13 a 16-14
    sistemas multivariantes, 16-15 a 16-18
    sorbente fluido, 16-11 a 16-18
  constantes de (*véase* Constante de equilibrio)
  líquido líquido:
    coeficiente de actividad, 15-6 a 15-7
    coeficiente de distribución, 15-5
    datos de, 15-8
    diagramas ternarios, 15-5
    interacciones de los enlaces de hidrógeno, 15-7 a 15-8
    pendiente de la línea de equilibrio, 15-5
    punto de pliegue, 15-6
    separación relativa, 15-5
    sistemas ternarios, lista de los, 15-9 a 15-15
    temperatura crítica de la solución, 15-6
  de multicomponentes, 16-50
  razones de, 4-89
  de reacción:
    coordenadas, 4-90
    extensión del, 4-89
  termodinámico, 4-58, 4-85 a 4-93
    criterios de, 4-85
    químico, 4-89 a 4-93
    regla de las fases, 4-86 a 4-87
    vapor líquido, 4-86 a 4-87
Equilibrio de acción de masa en intercambio iónico, 16-14
Equilibrio de fase, 15-5 a 15-9
  sólido-líquido, 17-3
    diagrama de fase binaria, 17-3
    diagrama de fase eutéctica, 17-3
  [*véase también* Equilibrio(s), líquido líquido]
Equilibrio, problemas de, 2-8
Equilibrio químico (*véase* Equilibrios)
Equilibrio, relación de, K, 13-17 a 13-19
Equipo de operación intermitente:
  calentamiento y enfriamiento del, 10-39 a 10-41
    encamisado e intercambiador externo de calor, 10-40
    lotes no agitados, 10-41
    pérdidas de calor de los tanques, 10-41
    pérdidas externas de calor, efecto de las, 10-40
    serpentín interno e intercambiador externo de calor, 10-41
    tanques de almacenamiento, 10-41
  tamaño óptimo del intercambiador, 10-41 a 10-42
Escalamiento:
  de recipientes agitados, 21-67
  de reactores químicos, 4-23 a 4-27
    método combinado, 4-26
    método convencional, 4-26
    método estadístico, 4-26
    modelo matemático, 4-24 a 4-26
    similitud química, 4-23 a 4-24
Escamado, 8-79, 11-49
Esfera:
  área de la, 2-13
  volumen de la, 2-13
    segmento, 1-27
Esferoide achatado en los polos:
  área de, 2-14
  volumen del, 2-14
Esferoide ahusado:
  área del, 2-14
  volumen del, 2-14
Esferoides:
  área de los, 2-14
  volumen de los, 2-14
Esfuerzo:
  de corrosión por grietas en tuberías, 6-41
  de desplazamiento en tuberías, 6-92
  permitido:
    en tuberías, tabla, 6-84 a 6-91
    en recipientes a presión, 6-124
  en tuberías, 6-78 a 6-79, 6-103, 6-92
Esfuerzo de ruptura en materiales para alta temperatura, 23-63
Esfuerzo en tuberías, factor de intensificación del, tabla, 6-99
Espacio tiempo, 4-29
Espacio velocidad, 4-30
Espectroscopía de resonancia del espín del electrón, 4-18
Espectroscopía de resonancia magnético nuclear, 4-18
Espesadores:
  tipo filtro, 19-92
  por gravedad, 19-62 a 19-64
    de alta velocidad, 19-62 a 19-64
    de columna central apoyada, 19-67
    convencionales, 19-62
    costo de los, 19-72
    criterios de diseño, 19-72
    y condici
    montajes de
    de rastrillos,
    de un solo co
    tanques, 19-
    de tracción, 1
    de puente ap
Espirales, hiperból
Espuma, densidad
Espuma, flujo de,
Espuma, pérdidas
Espuma(s), 18-64
  acanalamiento
  agentes estabili
  coalescencia, 1
  control de la, en
  definición de la,
  desagüe de la, 1
  eliminadores se
  emulsificadore
  equipo para pro
  formación de, 1
    teoría, 18-6
  de jabón, defini
  en láminas, 18-
  Marangoni, efe
  prevención de
  producción de,
  rompimiento d
  separación de l
  técnicas de eli
    eléctricas, 1
    mecánicas,
    métodos té
    químicas, 1
  transportadore
Espuma, zona de,
Estadística, 2-85
  datos de enum
  densidades de
  desviación est
  distribución m
  distribuciones,
  distribuciones
  funciones de p
  mínimos cuad
  modelos de po
  regresión múlt
  regresión no li
  pruebas de la
  variables aleat
  variancia pop
Estado funicular,
Estado pendular,
Estados de ingre
Esterilización, 2
  continua, 27-1
  por filtración,
  intermitente,
  del medio, 27-
Estimación de c

ico, 16-14
41
llor, 10-40
l-40
de calor, 10-41
l-42
ratura, 23-63
, tabla, 6-99
in, 4-18
4-18

y condiciones de operación, 19-71
montajes de unidades motrices, 19-67
de rastrillos, 19-67 a 19-68
de un solo compartimiento, 19-72
tanques, 19-67
de tracción, 19-67
de puente apoyado, 19-67
Espirales, hiperbólicas, 2-22
Espuma, densidad de, 18-85
Espuma, flujo de, 5-44
Espuma, pérdidas por, 11-40 a 11-41
Espuma(s), 18-64 a 18-65, 18-95
acanalamiento de la, 17-69
agentes estabilizadores de, 18-96
coalescencia, 17-69 a 17-70
control de la, en el automóvil, 18-97
definición de la, 18-62
desagüe de la, 17-69
eliminadores secundarios de espuma, 18-96
emulsificadores de, 18-96
equipo para producir, 18-72 a 18-73
formación de, 18-64
teoría, 18-62
de jabón, definiciónn de la, 18-62
en láminas, 18-62
Marangoni, efecto de, 18-95
prevención de la, 18-97
producción de, 18-62
rompimiento de la, 17-70
separación de la, 18-95
técnicas de eliminación de, 18-95 a 18-97
eléctricas, 18-96
mecánicas, 18-96
métodos térmicos, 18-95
químicas, 18-96 a 18-97
transportadores de, 18-96
Espuma, zona de, 18-16
Estadística, 2-85 a 2-120
datos de enumeración, 2-87 a 2-89
densidades de muestreo, 2-89 a 2-92
desviación estándar, 2-86
distribución multinominal, 2-89
distribuciones, 2-90 a 2-92
distribuciones de probabilidad, 2-87 a 2-89
funciones de probabilidad, 2-86
mínimos cuadrados lineales simples, 2-111 a 2-113
modelos de población, 2-85
regresión múltiple, 2-116 a 2-120
regresión no lineal simple, 2-113 a 2-116
pruebas de la hipótesis, 2-92 a 2-111
variables aleatorias, 2-85
variancia popular, 2-86
Estado funicular, definición del, 20-5
Estado pendular, definición del, 20-5
Estados de ingresos, 25-43
Esterilización, 27-12 a 27-14
continua, 27-14
por filtración, 27-12 a 27-13
intermitente, 27-14
del medio, 27-13
Estimación de costos:
costos de arranque, 25-81
control del proyecto, 25-82 a 25-83
rápidas, 25-70
rápidas de costos de fabricación, 25-61 a 25-62
enfoque modular, 25-77
estimaciones de la planta auxiliar, 25-80
en el extranjero, 25-84 a 25-86
método exponencial, 25-70
método del factor, 25-70
métodos de factores múltiples, 25-72 a 25-77
de sistemas de tubería, 25-78
tiempo de construcción, 25-82
uso de la computadora, 25-81
Estimación de costos para la instalación de plantas en el extranjero, 25-84 a 25-86
Etano:
calor:
de combustión, 3-300
específico, 3-169
de evaporación, 3-150 a 3-153
de formación, 3-179
latente, 3-147
conductividad térmica, 3-291 a 3-299
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-179
Joule Thomson, coeficiente de, 3-131 a 3-134
Prandtl, número de, 3-291 a 3-299
relación de calor específico, 3-173
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-83
hasta 1 atm, 3-72
propiedades físicas del, 3-39
propiedades termodinámicas de, 3-231 a 3-232
solubilidad en agua, 3-125
viscosidad del, 3-291 a 3-293
Etanol:
agua, sistema de, 12-47
fermentadores, 27-8
destilación, 18-19
Etapa teórica o de equilibrio, definición de la, 15-4
Etapas teóricas:
altura de las, 15-19
cálculo de las:
a contracorriente, 15-15
para flujo transversal, 15-15
método del triángulo recto, 15-16
métodos abreviados, 15-16
Etilamina, propiedades termodinámicas de la, 3-232
Etilbenceno-estireno, destilación del sistema, 18-20
Etilenglicol, 12-47
calor:
específico, 3-164, 3-168, 3-171, gráfica, 3-174
de evaporación, 3-151
conductividad térmica, 3-297
gráfica, 12-48
gravedad específica, gráfica, 12-48
presión de vapor del: hasta 1 atm, 3-73
viscosidad del, 3-295 a 3-296
gráfica, 12-48

Etileno:
calor:
de combustión, 3-196
específico, 3-164, 3-169
latente, 3-147
conductividad térmica, 3-291
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
Prandtl, número de, 3-291, 3-300
relación de calor específico, 3-238
presión de vapor:
arriba de 1 atm, 3-83
hasta 1 atm, 3-73
propiedades físicas del, 3-40
propiedades termodinámicas del, 3-233 a 3-234
solubilidad en agua del, 3-125
viscosidad del, 3-291, 3-292
Etilo, cloruro de:
calor:
específico, 3-164, 3-168
de evaporación, 3-151 a 3-152
compresibilidad del, 3-143
densidad del, 3-98
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-83
hasta 1 atm, 3-73
propiedades físicas del, 3-40
propiedades termodinámicas del, 3-232
viscosidad del, 3-292 a 2-296
Euler:
ecuación de, 2-47
Lagrange, ecuaciones de, 2-81
Maclaurin, fórmula de, 2-41
método modificado de, 2-71
método para molienda, 8-19
número de, 2-123
Evaporación, definición de, 18-3
Evaporación instantánea, cálculos de, 3-29 a 3-30
adiabática, 3-30
isotérmica, 3-30
ecuación de Rachford-Rice, 3-30
para mezclas complejas, 13-28
de una sola etapa, 13-9
de tres fases, 13-28
Evaporador agitado de película delgada, 11-38
Evaporador de cambio de canal, 11-38
Evaporadores, 10-35 a 10-38, 11-10, 11-26, 11-34
accesorios para, 11-46 a 11-47
de agua de mar, 11-43
costos de los, 11-47
aplicación de la diferencia de temperatura en los, 11-39 a 11-40
aplicaciones de los, 11-34 a 11-36
arreglo de los, 11-41 a 11-43
cálculo de los, 11-43 a 11-47
de cambio de canal, 11-38
en cascada, 11-39
de circulación forzada, 10-35, 11-35 a 11-36
coeficientes de seudotransferencia de calor en los, 11-48
de combustión sumergida, 11-38
corrosión en los, 11-34
costos de los, 11-47 a 11-48
de capital, 11-48
de operación, 11-48
de disco, 11-39
efecto de los incondensables en los, 10-40
de efecto múltiple, 11-34
evaporación, 11-42
efecto de las propiedades del fluido en los, 10-39
efectos de la superficie metálica en los, 10-38
formación de depósitos salinos en los, 11-34
formación de incrustación en los, 11-34
intermitentes, 11-42
de película descendente, 10-38, 11-37 a 11-38
de película fina, agitada, 11-38
operación de los, 11-48
remoción de sal de los, 11-47
sistemas de venteo para los, 11-46 a 11-47
de un solo efecto, 11-41
de termocompresión, 11-41
de termocompresión con chorro de vapor, 11-41 a 11-42
de termocompresión mecánica, 11-41
optimización del diseño, 11-45
tipos de, 11-34 a 11-39
varios, 10-37
transferencia de calor en los, 11-34
verticales de tubo corto, 10-37, 11-36
verticales de tubo largo, 10-35 a 10-36, 11-36 a 11-38
de película descendente, 10-38
coeficientes de transferencia de calor para, tabla, 10-36
Evaporadores de agua de mar, 11-43
Evaporadores en cascada, 11-39
Evaporadores con circulación forzada, 11-35 a 11-36
Evaporadores de combustión sumergida, 11-38 a 11-39
Evaporadores de efecto múltiple, 11-34
Evaporadores instantáneos, 11-39
Evaporadores de un solo efecto, 11-41
Evaporadores de termocompresión, 11-41, 11-44
Evaporadores verticales de tubo corto, 11-36
Evaporadores verticales de tubos largos, 11-36 a 11-38
Evaporización instantánea, definición de la, 18-3
Evaporización instantánea de equilibrio, 13-97 a 13-98
Evaporización instantánea, flujo de, 5-49 a 5-51
Excentricidad, 2-21
Exclusión de iones, 16-5 a 16-6
Exfoliación en tuberías, 6-41
Exhibidores analógicos (*véanse* Indicadores, Registradores)
Expansión (*véase* Expansión térmica)
Expansión del esfuerzo, 6-92
Expansión, factores de:
en orificios, 5-16
en toberas de flujo, 5-14
Venturi, en medidores, 5-14
Expansión isoentálpica, 12-53
Expansión isoentrópica, 12-54
Expansión, juntas de:
diseño de las, en sistemas de tuberías, 6-100 a 6-101
anclas para, 6-101
en intercambiadores de calor, 11-6 a 11-9
cabezales formados, 11-8
cabezales embridados y con conductos, 11-9
cabezales sólo embridados, 11-9
cascos abocinados, 11-9

figura, 11-9
fuelles, 11-8
fuelles toroid
placas planas
toroidales, 1
Expansión térmica
expansión cúbic
de líquidos,
de sólidos, t
expansión linea
de elemento
de sustancia
coeficientes de
para aceros
para metale
para metale
para no met
de combustible
Exponentes (pote
Expresiones alge
Exprimido, 19-1
definición del,
equipo para el,
costo del, 1
(*véase tam*
objetivo del, 1
teoría del, 19-
condicione
velocidad
Extracción:
por disociació
líquido líquid
alimentaci
aplicacion
con corrie
contactor
contactor
a contracc
definición
eficiencia
equilibrio
etapa teór
etapas, cá
de etapas
extracto,
factor de
Kremser,
propieda
refinado,
solutos, 1
solvente
solvente
(*véas*
unidad d
cálcu
de separació
del sorbente
Extracción co
Extracto, 15-3
Extractor cent

figura, 11-9
fuelles, 11-8
fuelles toroidales, 11-8
placas planas, 11-8
toroidales, 11-8
Expansión térmica, 3-127 a 3-130, 6-92
expansión cúbica:
de líquidos, tabla, 3-130
de sólidos, tabla, 3-130
expansión lineal:
de elementos sólidos, tabla, 3-127 a 3-128
de sustancias misceláneas, tabla, 3-128
coeficientes de:
para aceros de baja alcación, 23-47
para metales y aleaciones, 23-39 a 23-41
para metales, tabla, 6-94 a 6-95
para no metales, tabla, 6-103
de combustibles derivados del petróleo, 9-15
Exponentes (potencias y raíces), 2-10
Expresiones algebraicas, 2-15 a 2-16
Exprimido, 19-114 a 19-118
definición del, 19-114
equipo para el, 19-114 a 19-116
costo del, 19-115
(*véase también* Prensas)
objetivo del, 19-114
teoría del, 19-114
condiciones de equilibrio, 19-117
velocidad de, 19-117 a 19-118
Extracción:
por disociación, 15-4
líquido líquido:
alimentación, 15-3
aplicaciones de la, 15-3
con corriente transversal, 15-4
contactor diferencial, 15-4
contactor por etapas, 15-4
a contracorriente, 15-4
definición de la, 15-3
eficiencia de la etapa, 15-19
equilibrio de fase, 15-5 a 15-8
etapa teórica, altura de la, 15-19
etapas, cálculo de las, 15-8, 15-15 a 15-21
de etapas fraccionadas, 15-20 a 15-21
extracto, 15-3
factor de extracción, 15-17
Kremser, ecuación de, 15-17
propiedades del solvente, 15-8
refinado, 15-3
solutos, 15-3
solvente de alimentación, 15-3
solvente de lavado, 15-15
(*véase también* Etapas teóricas, cálculo de las)
unidad de transferencia de masa, a contracorriente, cálculo de la, 15-19
de separación, 16-6
del sorbente con exclusión de iones, 16-6
Extracción con solvente (*véase* Extracción líquido-líquido)
Extracto, 15-3
Extractor centriwesta, 21-90
Extractor Quadronics, 21-90
Extractores:
de Fenske, 21-74
de Graesser, 21-74
líquido líquido, 21-60 a 21-90
centrífugos, 21-89 a 21-90
sedimentadores-mezcladores, 21-72 a 21-74
eficiencias globales de las etapas, 21-74
torres, 21-76 a 21-90
de Lurgi, 21-74
tipo Liquid Dynamics, 21-90
transferencia de calor en mezcladores, 21-64
velocidades de transferencia de masa, 21-67, 21-78, 21-82
mezcladores, 21-63, 21-67 a 21-68
torres, 21-78 a 21-80, 21-82
Extractores centrífugos, 21-89 a 21-90
Extrusores de tornillo, 8-74
Exudación, 17-5
Eyector elevador, 6-32
Eyectores, 5-24 a 5-25, 6-17, 6-32 a 6-33
curvas de diseño de los, 6-34
de chorro de vapor, 6-32
funcionamiento de los, 6-33
usos de los, 6-33
(*véase también* Chorros)

Factor acéntrico, 3-312
Factor adiabático, 4-37
Factor de caracterización UOP, UOP-K, 13-79
Factor de efectividad en catálisis, 4-43 a 4-46
Factor F, 18-6
Factor Z de sobrecompresibilidad, 9-19
Factores métricos de conversión, 1-13 a 1-14
Factorización, 2-15
Fagergren, máquina de, 21-52
Fair, correlación de, 18-60
Fanning, ecuación de, 5-27
factores de fricción, 5-27
canales no circulares, 5-29
flujo no newtoniano, 5-30
(*véase también* Fricción, factores de)
Fase eutéctica, sistema de, 17-3 a 17-4
Fatiga en metales, corrosión por, 6-124
Felvación, 8-9
Fenol, datos de corrosión, 23-30 a 23-32
Fenómenos de propagación, 4-28
problemas de los, 2-8
Fenske, ecuación de reflujo total, 13-39
Fenske, extractor de, 21-74
Fenske-Underwood-Gilliland, métodos de, 13-39 a 13-41
volatilidades relativas de, 13-39
Feret, diámetro de, 8-7
Fermentación, recuperación del producto, 27-14 a 27-15
Fermentador a baja presión (Vacuferm), 27-8
Fermentadores, 27-6 a 27-9
Fertilizantes:
de desperdicios sólidos, 26-80
molienda de, 8-60
sedimentos como, 26-51

Filtración, 19-73 a 19-98
centrífuga:
costos de la, 19-111 a 19-114
teoría de la, 19-111
clasificación de la, 19-73
definición de la, 19-73
efecto de:
la concentración de sólidos, 19-76
la presión, 19-75
tamaño de partícula, 19-76
la temperatura, 19-76
tipo de medio filtrante sobre la, 19-76
la viscosidad, 19-76
equipo para (*véase* Filtros)
espesor de la torta, 19-75
filtro de función doble, 17-61 a 17-62
con flujo transversal: 17-56 a 17-59
electrofiltración, 17-59 a 17-61
equipo para la, 17-58 a 17-59
migración radial, 17-57 a 17-58
polarización de partícula, 17-57
ventajas de la, 17-56 a 17-57
interpretación de los datos de, 19-76 a 19-77
a presión constante, 19-75
a presión variable, 19-75
pruebas a pequeña escala, 19-75
compresión permeabilidad, 19-80
placas y marcos, 19-80
presión, 19-78
resultados del escalamiento, 19-80
vacío, 19-77
significación de las ecuaciones de, 19-75
teoría de la, 19-73 a 19-77
ultrafiltración, 19-96
a velocidad constante, 19-75
a velocidad variable, 19-75
Filtro(s):
de aire (*véase* Filtros de aire)
de arena, 19-94
Dyna, 19-94
de bolsas, 19-96
de cartucho, 19-92 a 19-93
flexibilidad del, 19-84
centrífugo, 19-106 a 19-114
de pantalla cónica, 19-109
(*véase también* Centrífugas, como filtros)
de clarificación, 19-92 a 19-97
separador de electrofiltro, 19-97
costo de los, 19-98
de disco, 19-90 a 19-92
Frantz Ferro-Filter, 19-96
de función doble, 17-61 a 17-62
Idrex HLF, 19-87
de lecho granular, 20-116 a 20-117
de lecho profundo, 19-94
magnéticos, 19-97
mecánicos o de borde, 19-93
de placas horizontales, 19-82
de presión:
Cyclamatic, 19-94
de descarga centrífuga, 19-87
de hojas, 19-85 a 19-86
de hojas horizontales, 19-86
de hojas verticales, 19-86 a 19-87
con prerrecubrimiento, 19-96
tubulares, 19-84
ventajas y aplicaciones de los, 19-87
(*véase también* Filtros prensa)
Rosenmund, 19-82
Schenk, 19-87
selección de los, 19-97 a 19-99
capacidad de lavado, 19-98
de tambor rotatorio, 19-88 a 19-90
Bird-Young, 19-89
Coilfilter, 19-89
de descarga por banda, 19-89
de descarga por raspador, 19-88
de descarga por resorte, 19-88 a 19-89
de descarga por rodillo, 19-89
Fest, 19-89 a 19-90
con medio removible, 19-89
con prerrecubrimiento continuo, 19-90
de tela, 20-110 a 20-116
de torta, 19-81 a 19-88
intermitente, 19-81 a 19-88
continua, 19-88
de pulpa, 19-92
ultrafiltros, 19-94 a 19-95
Nutrex, 19-82
nutsche, 19-81
de vacío:
de bandeja inclinada, 19-91
horizontales, 19-91 a 19-92
Pannevis, 19-91
Filtro(s) de aire, 20-119 a 20-124
características de, 20-121
continuos (automáticos), 20-121, 20-122
de panel, 20-121
partícula de alta eficiencia (HEPA), 20-123
seco, 20-121
teoría de, 20-119 a 20-121
tipos de, 20-121 a 20-123
viscoso, 20-121
Filtros de bolsas, 20-109 a 20-117
eficiencia de recolección de, 20-114 a 20-116
inversos:
flujo de limpieza, 20-113
pulso, 20-113
materiales para, 20-114
fieltro, 20-114
tejido, 20-114
tipos de, 20-111
Filtros, espesadores para, 19-92
Filtros de lechos granulares, 20-117 a 20-118
fijos, 20-116
lavables, 20-117 a 20-118
Filtros prensa, 19-83 a 19-84
de placas, 19-92 a 19-93
de placas y marcos, 19-83 a 19-84
de placas ranuradas, 19-84
Filtros de tela, siste
Fischer-Tropsch, sí
Fischer, prueba de,
tabla, 9-8
Flexibilidad:
axial, 6-92
esfuerzos de, 6-9
factores de, en tu
tabla, 6-97
a la flexión, 6-92
a la torsión, 6-92
en tuberías metá
Floculación, 20-88
en sedimentació
en sólidos ultrafi
Flotación, 21-51 a
aplicaciones de l
coloidal, 17-66
costos de, 21-52
definición de la,
equipo para la, 2
capacidades,
tamaño máxi
de minerales, 17
molecular, 17-6
reactivos de, 21-
modificador
promotores (
espumadores
de precipitados,
ultraflotación, 2
Fluidez, 5-5
Fluidificación, 20-
Fluidificador cilín
Fluido dilatador, 5-
Fluido estático, 5-
Fluido reopéctico,
Fluidos, 5-5
definición de, 5-
dependencia del
dilatación de, 5-
distribución de,
fluidos tixotrópi
flujo de (*véase* F
reopécticos, 5-5
de servicio, defi
transporte masiv
en carros tan
en camiones
por mar, 6-1
materiales de
en tuberías, 6
viscoelásticos, 5
Fluidos criogénico
Fluidos, dinámica
balance de energ
balance de mom
Bernoulli, teore
estado inestable
terminología, 5-
(*véanse también*

Filtros de tela, sistemas de, 26-22
Fischer-Tropsch, síntesis de, 9-41, 20-80
Fischer, prueba de, 9-8
  tabla, 9-8
Flexibilidad:
  axial, 6-92
  esfuerzos de, 6-92
  factores de, en tuberías, 6-92
    tabla, 6-97
  a la flexión, 6-92
  a la torsión, 6-92
  en tuberías metálicas, 6-92
Floculación, 20-88 a 20-90
  en sedimentación por gravedad, 19-61 a 19-62
  en sólidos ultrafinos, 21-55
Flotación, 21-51 a 21-55
  aplicaciones de la, 21-52
  coloidal, 17-66
  costos de, 21-52
  definición de la, 17-66
  equipo para la, 21-51 a 21-54
    capacidades, 21-52
    tamaño máximo de la celda, 21-53
  de minerales, 17-66
  molecular, 17-66
  reactivos de, 21-51
    modificadores, 21-51
    promotores (colectores), 21-51
    espumadores, 21-51
  de precipitados, 17-66
  ultraflotación, 21-57
Fluidez, 5-5
Fluidificación, 20-66
Fluidificador cilíndrico, 20-69
Fluido dilatador, 5-5
Fluido estático, 5-7 a 5-8
Fluido reopéctico, 5-6
Fluidos, 5-5
  definición de, 5-5
  dependencia del tiempo, 5-5
  dilatación de, 5-5
  distribución de, 5-53 a 5-56
  fluidos tixotrópicos, 5-5
  flujo de (*véase* Flujo, de fluidos)
  reopécticos, 5-5
  de servicio, definición del, 6-77
  transporte masivo de, 6-117 a 6-120
    en carros tanque, 6-117
    en camiones tanque, 6-119
    por mar, 6-120
    materiales de construcción para el, 6-120
    en tuberías, 6-116
  viscoelásticos, 5-6
Fluidos criogénicos, 12-52
Fluidos, dinámica de, 5-23 a 5-70
  balance de energía, 5-23
  balance de momento, 5-24 a 5-26
  Bernoulli, teorema de, 5-23
  estado inestable, 5-67 a 5-68
  terminología, 5-6
  (*véanse también* Flujo de fluidos; Flujo de dos fases)
Fluidos no newtonianos, 5-28 a 5-30
  definición de los, 5-5
  flujo de los, 5-29
  ley de potencia, 5-5
Fluidos seudoplásticos, 5-5
Flujo:
  de fluidos:
    alrededor de objetos, 5-62 a 5-65
    anular, 5-46
    bifásico (*véase* Flujo de dos fases)
    de burbujas, 5-45
    en canales no circulares, 5-28 a 5-29
    carga de fricción, 6-5
    compresibles, 5-31
    de condensación, 5-50, 5-51
    para conductos, 20-57
    por desplazamiento, 6-4
    disperso, 5-46
    distribución del, 5-54 a 5-56
    de espuma, 5-44
    estratificado, 5-43
    por fuerza centrífuga, 6-4
    por fuerza electromagnética, 6-4
    por impulso mecánico, 6-5
    incompresibles, 5-26
    no isotérmico, 5-30 a 5-31
    laminar, 5-6, 5-26
    lento, 5-6
    no newtonianos, 5-29 a 5-31
    ondular, 5-46
    de película, 5-65
    perfil aerodinámico, 5-6
    a pistón, 5-45
    régimen no permanente, 5-67 a 5-68
    de rocío, 5-43
    trabajo realizado, 6-5
    por transferencia de momento, 6-4 a 6-5
    a través de accesorios y válvulas, 5-41
    a través de lechos de sólidos, 5-60
    a través de medios porosos, 5-62 a 5-63
    a través de pantallas, 5-43 a 5-45
    a través de placas desviadoras, 5-44
    en tuberías y canales, 5-26 a 5-44
    turbulento, 5-5, 5-31
    de vaporización instantánea, 5-49
    velocidad, 6-5
    viscosidad, 6-5
    viscosos, 5-7
    visualización, 5-12 a 5-13
  de gas(es):
    adiabático, 5-31 a 5-35
    por deslizamiento, 5-35
    isotérmico, 5-31
    laminar, 5-35
    molecular, 5-37
    a través de toberas, 5-36
  de líquidos, 5-10 a 5-71
  medios de producción de, 6-4
  de mezclas gas-líquido, 5-49
  de mezclas gas-sólido, 5-51 a 5-53
  de mezclas líquido-gas, 5-45 a 5-52

de plásticos Bingham, 5-28
visualización, 5-13 a 5-14
Flujo adiabático, 5-31 a 5-34
Flujo anular, 5-45
Flujo de burbujas, 5-45
Flujo capilar, 20-10
Flujo, compresible, 5-31
laminar, 5-31
turbulento, 5-31
Flujo continuo, 5-6
Flujo crítico:
en orificios, 5-17
en toberas, 5-15
Flujo, densidad de, 21-37
Flujo discontinuo de efectivo, 25-12
Flujo, distribuidores de, 5-47 a 5-57
Flujo de dos fases:
caída de presión, 5-46 a 5-47
de gases y sólidos, 5-51 a 5-54
velocidad mínima de acarreo, 5-53
velocidad de transporte, 5-53 a 5-54
fracción volumen, 5-47
de líquidos y gases, 5-45 a 5-51
anular, 5-46
burbuja, 5-45
espuma, 5-45
estratificado, 5-46
ondulado, 5-46
pulsatorio, 5-46
rociado o disperso, 5-46
tapón, 5-45
vaporización, 5-49 a 5-51
Flujo estratificado, 5-46
Flujo laminar, 5-6
Flujo lento, 5-6
Flujo, medición del, 5-8 a 5-23, 22-43
Flujo, medidores de:
de área, 5-20
de carga, 5-13 a 5-20
de codo, 5-17 a 5-20
de orificio (*véase* Orificio(s), medidores de flujo de)
venturi (*véase* Venturi, medidores de)
de corriente, 5-13
de masa (*véase* Medidores de flujo de masa)
para sistemas de dos fases, 5-22
de turbina, 5-12
de velocidad, 5-10 a 5-13
Flujo molecular, 5-37 a 5-38
Flujo no isotérmico, 5-30 a 5-31
Flujo pulsatorio, 5-11, 5-68
Flujo radial en lechos de sorbentes, 16-34 a 16-36
Flujo tapón, 5-45
Flujo, toberas de, 5-14 a 5-15
crítico, 5-15
orificios y, 5-42
pérdida permanente de presión en, 5-14 a 5-15
velocidad de descarga para las, 5-14
Flujo turbulento, 5-7 a 5-31
Flujo viscoso, 5-6
Flujos de efectivo, 25-5 a 25-7, 25-12 a 25-13
comparación de incrementos de, 25-17 a 25-18

Flúor:
calor:
capacidad de, 3-156
latente, 3-144
constantes críticas, 3-135
presión de vapor hasta 1 atm, 3-62
propiedades físicas del, 3-15
propiedades termodinámicas del, 3-234 a 3-235
viscosidad del, 3-292 a 3-293
Focos, 2-21
Forchheimer, ecuación de, 5-62
Formación de sales, definición de la, 11-34
Formas escalonadas de las matrices, 2-59
Formas indeterminadas de las funciones, 2-31 a 2-32
Fórmulas para área, 2-12
del cilindro, 2-13
circular:
anillo, 2-13
segmento, 2-14
del círculo, 2-13
del cono, 2-13
del cuadrilátero, 2-12
de la elipse, 2-13
de la esfera, 2-14
del esferoide:
achatado, 2-14
alargado, 2-14
formas irregulares, 2-14
del paralelepípedo rectangular, 2-13
del paralelogramo, 2-12
del prisma, 2-13
del rombo, 2-12
de la pirámide, 2-13
del rectángulo, 2-12
regular:
polígono, 2-12
poliedro, 2-13
de la sección de parábola, 2-13
del toro, 2-13
del trapezoide, 2-12
del triángulo, 2-12
varias, 2-14
Fórmulas de medición, 2-12 a 2-14
Fotosíntesis, 27-5
Fourier, método de, para la medición de la partícula, 8-7
Fourier, número de, 2-123
Fourier, transformada de, 2-56, 2-76
coseno de la, 2-56
Fourier, transformada discreta de, (DFT), 2-78
Fourier, transformada rápida de (FFT), 2-78
Fraccionamiento:
en columna de líquido, 18-52 a 18-53
tipo atomización, 18-52
tipo sinusoidal (oscilación transversal), 18-52
tipo varicoso (oscilación simétrica), 18-52
control del, 22-109 a 22-128
básico, 22-126
calidad del producto, 22-126
entrada de calor, 22-127
predecible, 22-127
extracción disociación, 15-4

en gotitas, 18-5
agotamiento
debido a cho
tipo bolsa, 1
en lámina de líq
desintegraci
desintegraci
desintegraci
desintegraci
líquido líquido,
Fraccionamiento,
Francis, fórmula d
Franz Isodynamic
Franz, separador,
Frecuencia, defini
Frecuencia, factor
Fredholm, ecuaci
Fricción:
factores de:
en bancos d
en codos y t
en flujo no i
en lechos y
en películas
en fluidos:
en agrandan
accesorios y
codos y tub
en contracci
en entradas,
placas desvi
en salidas, 5
(*véase tamb*
Froude, número d
Fuelles (*véase* M
Fuerza electromo
Fuerza(s):
en codos, 5-23
de tiro, 5-70
Fuerzas electrost
Fuerzas magnétic
Fugacidad, 4-65
Fugas de lechos f
integrales, 16-
promedio, 16-
Fuller, tierra de, 1
Función restrictiv
Función de super
efectos de la in
Funciones:
complejas, 2-4
elementales, 2
Funciones, armó
Funciones expon
Funciones, hiper
inversas, 2-43
Funciones de pol
Funciones termo
(*véase tambié*
Funciones de tra
funcion

en gotitas, 18-53 a 18-54
agotamiento del, 18-54
debido a choque, 18-54
tipo bolsa, 18-53
en lámina de líquido, 18-53
desintegración tipo bordo, 18-53
desintegración tipo lámina gruesa, 18-53
desintegración tipo lámina perforada, 18-53
desintegración tipo onda, 18-53
líquido líquido, 15-4
Fraccionamiento, etapas de, 15-20 a 15-21
Francis, fórmula de, 5-21
Franz Isodynamic, separador, 21-45
Franz, separador, 21-44
Frecuencia, definición de la, 21-87
Frecuencia, factor de, 4-3
Fredholm, ecuaciones integrales de, 2-53
Fricción:
factores de:
en bancos de tubos, 5-57 a 5-59
en codos y tuberías curvas, 5-43
en flujo no isotérmico, 5-59
en lechos y sólidos, 5-60
en películas descendentes, 5-66
en fluidos:
en agrandamientos, 5-40
accesorios y válvulas en tuberías, 5-41 a 5-42
codos y tuberías curvas, 5-42 a 5-43
en contracciones, 5-38 a 5-41
en entradas, 5-38 a 5-40
placas desviadoras, 5-45
en salidas, 5-41
(*véase también* Caída de presión)
Froude, número de, 5-49
Fuelles (*véase* Medición de presión)
Fuerza electromotriz química en el análisis potenciométrico, 22-54
Fuerza(s):
en codos, 5-23
de tiro, 5-70
Fuerzas electrostáticas, 8-69
Fuerzas magnéticas, 21-38
Fugacidad, 4-65 a 4-66, 13-24
Fugas de lechos fijos:
integrales, 16-33 a 16-34
promedio, 16-33 a 16-34
Fuller, tierra de, 16-9
Función restrictiva, 2-30
Función de supervivencia medida (MSF), 25-32
efectos de la inflación sobre la, 25-37 a 25-39
Funciones:
complejas, 2-44
elementales, 2-43
Funciones, armónicas, 2-44
Funciones exponenciales, 2-10, 2-43
Funciones, hiperbólicas, 2-43
inversas, 2-43
Funciones de polinomio, 2-75 a 2-77
Funciones termodinámicas residuales, 4-65
(*véase también* Propiedades termodinámicas, relaciones de las)
Funciones de transferencia (*véase* Control automático, sistemas de funciones de transferencia)
Funciones trigonométricas, 2-42
inversas, 2-42
Fundición, 11-48
Gas, elevadores de, 5-47 a 5-48
Gas ideal, relaciones de compresión, 6-18
Gas-líquido, contacto, 18-3 a 18-61
(*véanse también* Dispersiones; Líquido gas, sistemas)
Gas(es):
absorción de, (*véase* Absorción de gas; Transferencia de masa)
agitación con, para líquidos no miscibles, 21-70
almacenamiento de, 6-116
análisis conductométrico de, 22-53
bombeo de, 6-17 a 6-18
calores específicos, 3-169
coeficiente de difusión, cálculo del, 3-333 a 3-334
compresión de, 6-18 a 6-22
conductividad térmica de los, 3-291 a 3-299
cálculos de la, 3-330 a 3-331
contenido de vapor de agua en, 3-94 a 3-95
ecuación virial para, 3-313 a 3-315
ecuaciones de estado para, 3-315 a 3-316
densidad en condiciones estándar, 3-98
difusividades en pares de, 3-301 a 3-302
factor de compresibilidad para, 3-314 a 3-315
nomograma de viscosidades para, 3-292 a 3-293
Prandtl, número de, 3-291
relación de calor específico para, 3-173
transporte masivo de, 6-117 a 6-120
viscosidades de los, 3-291
Gases, constantes de la ley de, valores de, 1-18
Gases, ley de los, 3-312 a 3-316
Gases, muestreo de, 18-77
Gases y sólidos, separación de, 20-79
Gates-Gaudin-Schumann, distribución de partícula de, 8-5
Gaudin-Meloy, distribución de partícula de, 8-5 a 8-6
Gauss, reducción de, 2-62
Gel, diálisis del, 16-5
Gel, permeación del, 16-6
Generación de vapor, costo de las intalaciones de, 25-80
Generador de gas con émbolo libre, 24-19 a 24-20
características de:
diseño, 24-20
operación, 24-20
combustibles, 24-20
instalación del, 24-20
recuperación de calor, 24-20
Generadores (*véase* Generadores de vapor)
Generadores de vapor, 9-72 a 9-83
calderas para centrales termoeléctricas, 9-73 a 9-77
características totales necesarias para, 9-73 a 9-77
economizadores para, 9-78
recalentadores, 9-78
sistemas de circulación en, 9-73 a 9-76
sistemas de encendido para entrada de calor a las, 9-77
sobrecalentadores, 9-78
calderas industriales, 9-78 a 9-83
criterios de diseño, 9-80
combustibles de desperdicios sólidos quemados en, tabla, 9-79
definición de, 9-77
factores que afectan el funcionamiento de, 9-81

circulación en, 9-73
chimeneas (*véase* Chimeneas)
definición de, 11-3
factores de diseño, 9-73
relación de circulación, definición de, 9-73
transferencia de calor en, 9-73
Geometría analítica, 2-19 a 2-24
Geometría analítica plana, 2-19 a 2-24
Geometría analítica de sólidos, 2-24
Gibbs, energía de, 3-322
Gibbs, función de, 5-61
Glicerina, datos de corrosión, 23-27 a 23-29
Glicol (*véase* Etilenglicol)
Gompertz, curva de, 25-28 a 25-30
Gotas:
arrastre de, 18-58
coagulación de, 18-92
distribución del tamaño de las, 18-58
líquido líquido:
circulantes, 21-75 a 21-76
coalescencia, 21-76
formación de, 21-74 a 21-75
oscilantes, 21-76
transferencia de masa, 21-76
valores propios para, tabla, 21-76
velocidad, 21-75
rocíos, 18-78
tamaño de:
de los atomizadores, 20-66
distribución del, gráfica, 18-56
efecto del, en las propiedades físicas, 18-54 a 18-55
en emulsiones agitadas, 21-67
en líneas de tuberías, 21-63
en líquidos no miscibles, 21-74
en neblina, 18-62
en rocíos, 18-52
rompimiento de la columna de líquido debido al, 18-52
rompimiento de la gota debido al, 18-53 a 18-54
rompimiento de la lámina de líquido debido al, 18-53
Grados de libertad, 2-30, 2-87, 13-23 a 13-26
Graeffe, técnica del cuadrado de la raíz de, 2-65
Graesser, extractor de, 21-74
Graetz, número de, 2-121
Gráfica del flujo de señales, 22-114 a 22-115
Gráfica psicrométrica:
agua en aire, 20-6
benceno en aire, 20-8
ecuación para la corrección de presión, 20-7
gráficas psicrométricas:
a altas temperaturas, 12-5
a bajas temperaturas, 12-4
a temperaturas intermedias, 12-4
tetracloruro de carbono en aire, 20-7
tolueno en aire, 20-8
uso de la, 12-6 a 12-13
a presiones distintas a la atmosférica, 12-13
Gráficas de punto de equilibrio, 25-8
Grafito:
corrosión, 23-5
intercambiadores de placas de, 11-24
como material de construcción, 23-55 a 23-56
propiedades del, 23-67
Granuladores, 11-49
Grashof, número de, 2-123
Gravedad, asentadores por, 18-80, 21-70 a 21-71
Gravedad, cámaras de asentamiento por, 20-93
Gravedad específica, 1-19
de combustibles derivados del petróleo, 9-12 a 9-18
de materiales misceláneos, 3-118 a 3-119
medición de la, 1-19
Gravedad, sedimentación por (*véase* Sedimentación, por gravedad)

Haces de tubos:
desviación, 11-19
ensuciamiento de los, 11-19
para intercambiadores de calor, 11-12
para intercambiadores enfriados por aire, 11-27
velocidad frontal que pasa a través de los, 11-28
vibración, 11-5
Hadden, corrección de temperatura, 13-78
Hadden, método de, 13-18, 13-20
Halógenos, 23-39 a 23-40
secos, 23-64
Hardgrove, índice de molibilidad de (HGI), 8-11
Hartford, circuito de, 9-90
Hastelloy, aleaciones de, como materiales de construcción, 23-44
Helio:
calor:
capacidad de, 3-156
latente, 3-144
conductividad térmica, 3-291 a 3-299
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividades en pares de gases, 3-301
Joule-Thomson, coeficiente de, 3-132
Prandtl, número de, 3-291
propiedades físicas del, 3-13
propiedades termodinámicas del, 3-235 a 3-236
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-125
viscosidad del, 3-291 a 3-293
Helio-4, 12-51
Helmholtz, función de, 4-60
Henry, ley de, 4-66, 14-9
Heptano, propiedades termodinámicas del, 3-238
Hermite, ecuación de, 2-48
Herschel, medidor venturi tipo, 5-13 a 5-14
Hertz, aplicación de la teoría de, 8-11
Hesketh, ecuación de, 18-90
HETP (*véase* Altura equivalente a una placa teórica)
Hidrógeno, 12-51
calor:
capacidad de, 3-156
de combustión, 3-195
específico, 3-169
latente, 3-144
compresibilidad del, 3-138
conductividad térmica, 3-291, 3-298
constante crítica, 3-135
densidad del, 3-98
difusividad en, 3-304
difusividades e
interacciones d
Joule-Thomso
Prandtl, númer
presiones de va
arriba de 1 a
hasta 1 atm,
propiedades fís
propiedades te
relación de cal
solubilidad en
viscosidad del,
Hidrógeno, peró
datos de corros
propiedades te
Hidrógeno, yodu
calor:
capacidad
específico,
de formaci
latente, 3-1
constantes crí
densidad del,
energía libre,
presión parcia
presión de vap
propiedades fí
razón de calor
viscosidad del
Hidrómetro, 22-
Hidroseparador
Hidrostática, 5-
Hierro:
colado, 23-5,
dúctil, 23-17
maleable, 23-
como materia
Hierro colado:
gris, 23-5 a 2
de baja ale
de alto silicio,
Hipérbolas, 5-6
Hiperboloides,
Hipótesis, prueb
análisis de va
análisis de va
Bartlett, prue
para dos prop
Duncan, prue
para observac
para pares ig
para el proce
para una prop
prueba de la
prueba de do
prueba de las
Hodgson, núme
Hölder, desigua
Hongos, 27-3 a
Hora estándar,

  - difusividades en pares de gases, 3-301
  - interacciones del enlace de, 15-7 a 15-8
  - Joule-Thomson, coeficiente de, 3-131, 3-134
  - Prandtl, número de, 3-291
  - presiones de vapor del:
    - arriba de 1 atm, 3-59
    - hasta 1 atm, 3-62
  - propiedades físicas del, 3-16
  - propiedades termodinámicas del, 3-239 a 3-242
  - relación de calor específico, 3-173
  - solubilidad en agua, 3-125
  - viscosidad del, 3-291, 3-293
- Hidrógeno, peróxido de (agua oxigenada):
  - datos de corrosión, 23-30 a 23-32
  - propiedades termodinámicas del, 3-242
- Hidrógeno, yoduro de:
  - calor:
    - capacidad de, 3-157
    - específico, 3-169
    - de formación, 3-183
    - latente, 3-144
  - constantes críticas, 3-135
  - densidad del, 3-98
  - energía libre, 3-183
  - presión parcial de las soluciones acuosas, 3-90
  - presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-62
  - propiedades físicas del, 3-15
  - razón de calor específico, 3-173
  - viscosidad del, 3-292 a 3-293
- Hidrómetro, 22-50
- Hidroseparadores, 21-24
- Hidrostática, 5-6
- Hierro:
  - colado, 23-5, 23-17, 23-41
  - dúctil, 23-17
  - maleable, 23-17
  - como material de construcción, 23-17
- Hierro colado:
  - gris, 23-5 a 23-17
    - de baja aleación, 23-5
  - de alto silicio, 23-41
- Hipérbolas, 5-6
- Hiperboloides, 2-25
- Hipótesis, prueba de la, 2-93 a 2-111
  - análisis de variancia de un camino, 2-102 a 2-103
  - análisis de variancia de dos caminos, 2-108 a 2-111
  - Bartlett, prueba de, 2-106 a 2-109
  - para dos proporciones, 2-98
  - Duncan, prueba del intervalo múltiple de, 2-106 a 2-108
  - para observaciones apareadas, 2-96
  - para pares igualados, 2-96
  - para el procedimiento de la media, 2-93
  - para una proporción, 2-97
  - prueba de la bondad del ajuste, 2-99 a 2-101
  - prueba de dos caminos, 2-101
  - prueba de las dos poblaciones, 2-95 a 2-96
- Hodgson, número de, 5-19 a 5-20
- Hölder, desigualdad de, 2-11
- Hongos, 27-3 a 27-4
- Hora estándar, 25-64
- Horner, método de la raíz de, 2-10
- Hornos:
  - de base de carretilla, 20-26
  - continuos, 20-32 a 20-33
  - de cubilote, 20-54 a 20-55
  - de elevador, 20-26
  - de fundición, 20-54
  - de hogar, 20-52 a 20-53
    - de hogar múltiple, 20-53
    - de hogar rotatorio, 20-26 a 20-27
  - intermitentes, 20-26 a 20-28
  - Mannheim, 20-52
  - regeneradores de calor (*véase* Regeneración de calor)
  - tipo mufla, 20-27
  - de tiro por convección forzada, 20-26
  - (*véanse también* Cubilotes; Secadores)
- HTU (*véase* Altura de las unidades de transferencia)
- Hule:
  - butilo, 23-53
  - *cis*-polibutadieno, 23-53
  - *cis*-polisopreno, 23-53
  - cloropreno, 23-53
  - duro, 23-53
  - elastómero de cloruro de polivinilo (Koroseal), 23-53
  - estireno, 23-53
  - etileno propileno, 23-53
  - fluoroelastómeros, 23-53
  - Hypalon, 23-53
  - natural, 23-53
  - neopreno, 23-53
  - nitrilo, 23-53
  - polietileno clorosulfonado, 23-53
  - propiedades del, 23-67
  - silicón, 23-53
- Hum-mer, malla de, figura, 21-17
- Humedad:
  - absoluta, definición de la, 12-3
    - porcentaje de, definición del, 12-3
  - relativa, 20-5
    - porcentaje de, definición del, 12-3
  - de saturación, 20-5
    - adiabática, 20-5
    - definición de la, 12-3
- Humedad crítica, contenido de, 20-4
- Humedad, gráficas de (*véase* Gráfica psicrométrica)
- Humedad, medición de la, 12-13 a 12-14
  - higrómetros eléctricos, 12-14
  - higrómetros mecánicos, 12-14
  - método del bulbo húmedo, 12-13 a 12-14
  - método gravimétrico, 12-14
  - método del punto de rocío, 12-13
  - (*véase también* Medición de humedad)
- Humedad relativa, porcentaje de, 20-5
- Humedad de saturación adiabática, 20-5
- Humo, definición del, 20-87
- Humphreys, concentrador espiral, 21-30 a 21-31

- Identidades de aproximación, 2-61
- Impactor en cascada, 18-78
- Impactores, 20-90

Impactores de rotor, 8-30
Impulsores de agitación, 19-96 a 19-9, 19-12
  con entrada lateral, 19-12
  con entrada por la parte superior, 19-12
Impulsores de banda, 24-50
Impulsores de engranes, 24-50 a 24-51
Incertidumbre, 25-22 a 25-31
Incrustación:
  definición de la, 11-34
  temperatura mínima para aleaciones, 23-72
Indeterminantes matemáticos, 2-9 a 2-10
Indicadores, 22-59 a 22-61, 22-66 a 22-70
  analógicos, 22-67
    accionados directamente, 22-67
    accionados eléctricamente, 22-66
    accionados neumáticamente, 22-66
    dispositivos de desviación, 22-66
    para material en movimiento, 22-66
    con señalador múltiple, 22-67
  digitales, 22-67 a 22-69
    con contadores mecánicos, 22-69
    eléctricos, 22-69
    lectura, 22-67 a 22-69
  facilidad de lectura, 22-61
    digital, 22-61
    instrumentos de escala ampliada, 22-61
    paralaje, 22-61
    repitibilidad, 22-60
    velocidad de respuesta, 22-61
  precisión de los, 22-60
Índice de hinchamiento libre del carbón (FSI), 9-7
Índice de refracción, medición del, 22-51
Inflación, 25-35 a 25-39
  diferencial, 25-39
  efecto de la:
    sobre DCFRR, 25-35 a 25-36
    sobre MSF, 25-37 a 25-38
    sobre NPV, 25-36
    sobre el periodo de reembolso, 25-37
Ingeniería bioquímica, 27-1 a 27-21
  (*véanse también*, Conceptos biológicos; Reactores biológicos)
Ingeniería genética, 27-5
Ingeniería de los procesos biológicos:
  cultivos mixtos, 27-18 a 27-19
  instrumentación y computadoras, 27-19
Inhibidores de corrosión, 23-8
Inmovilización de la enzima, 27-20 a 27-21
Instalaciones, costo de las, 25-61
Instrumentos de análisis:
  gas, 18-78
  nieblas, 18-78
Integración, 2-70 a 2-71
Integración gaussiana, fórmulas de, 2-71
Integración numérica, 2-71
Integral de convolución, 2-56
Intensidad del campo magnético, 21-47
Interacciones microbianas, 27-19
Intercambiador de anillo hidráulico empacado, 11-10
Intercambiador de cabezal flotante exterior, 11-10
  figura, 11-7
Intercambiador de cabezal flotante extraíble, 11-10
Intercambiador con cabezal flotante interno, 11-10
  figura, 11-6
Intercambiador de calor de tubo en U, 11-9
  figura, 11-7
Intercambiador de placa tubular fija, 11-6
Intercambiadores de calor, 6-28, 10-24 a 10-25
  con anillo de cierre hidráulico, 11-10
    figura, 11-8
  de bloques de grafito, 11-24
  con cabezal flotante interno, 11-10
  con cabezal flotante externo, 11-10
    figura, 11-7
  de cabezal flotante extraíble, 11-10
    figura, 11-7
  de canal, 11-12
  características del entubado, tabla, 11-11
  de casco y tubo, 11-3
  de casquete, 11-12
  con cierres especiales para alta presión, 11-12
  códigos de construcción, 11-3 a 11-5
  construcción del casco, 11-13
    casco de dos pasos, 11-13
    casco de un paso, 11-13
    tamaños de dos pasos, 11-13
  construcción del lado del tubo, 11-10 a 11-12
    el cabezal, 11-10
    los pasos, 11-12
  control de los, 22-119 a 22-126
  corrosión en los, 11-19
  costos de los, 11-20 a 11-21
  definición de los, 11-3
  diseño de los, 10-24
  efectos del ensuciamiento, 10-32
  enfriados por aire (*véase* Intercambiadores enfriados
    por aire)
  factor de correlación τ, gráficas, 10-27 a 10-28
  de flujo concurrente, 11-27
  con flujo a contracorriente, 10-25
  con flujo inverso, 10-25
  con flujo mixto, 10-25
  con flujo transversal, 10-26
  haces de tubos en los, 11-13
  juntas de expansión (*véase* Expansión, juntas de,
    en intercambiadores de calor)
  de lámina de cierre tubular fija, 11-6 a 11-11
    figura, 11-6
  materiales de construcción para los, 11-19
    materiales no metálicos, 11-20
  número de orificios en el laminado de tubos, tablas, 11-14 a 11-17
  pasos del lado del casco, 11-12
    figura, 11-6
  con placas desviadoras (*véase* Placas desviadoras)
  de película descendente, 11-26
  prueba de los, 11-6
  recomendaciones TEMA para los, 6-126
  rehervidor de caldera con cabezal flotante, 11-10
    figura, 11-7
  con secciones de tubos múltiples, 11-21
  para sólidos, 11-48 a 11-49
    para la fusión de sólidos, 11-50
    para solidific
    para sólidos d
    para sólidos l
  superficie del int
  con superficie ra
  tamaños de los c
  de Teflón, 11-26
  tipo placa (*véase*
  trayectoria de flu
  de tubo de bayon
  con tubo doble, 1
    costos de los,
  de tubo espiral, 1
  de tubo en U, 11-
    figura, 11-7
  tubos en los, 11-
  de tubos y casco
  con tubos espira
  vibración del ha
    acoplamient
    acoplamient
    derramamien
    variación de
  (*véase también*
    Operació
Intercambiadores
Intercambiadores
  (*véase también*
Intercambiadores
Intercambiadores
  cámaras de hum
  cara, velocidad
  condensadores:
    aéreos, 11-3
    de vapor, 11
  control de flujo
  costos de los, 1
  diseño de:
    aire forzado
    consideraci
    tiro inducid
  enfriadores aju
  enfriamiento p
  entubado de, 1
  haces de tubos
  recirculación d
  velocidad de la
Intercambiadores
Intercambiadores
  de aleta de plac
  en espiral, 11-
  de placas y ma
  superficie de p
Intercambiadores
Intercambiadores
Intercambio ióni
  aplicaciones d
  automatizació
  continuo y cas
  cromatografía
  curvas de rom

para solidificación, 11-48 a 11-49
para sólidos divididos, 11-53
para sólidos laminados, 11-51 a 11-52
superficie del intercambiador, 11-12
con superficie raspada, 11-26 a 11-27
tamaños de los cascos, 11-13
de Teflón, 11-26
tipo placa (*véase* Intercambiadores tipo placa)
trayectoria de flujo en los, 11-3
de tubo de bayoneta, 11-24
con tubo doble, 10-26, 11-23
costos de los, 11-23
de tubo espiral, 11-24 a 11-25
de tubo en U, 11-9
figura, 11-7
tubos en los, 11-8, 11-9, 11-28
de tubos y casco con placas desviadoras, 10-26 a 10-27
con tubos espiral para servicio criogénico, 11-25
vibración del haz de tubos, 11-5
acoplamiento acústico, 11-6
acoplamiento fluidoelástico, 11-6
derramamiento del vórtice, 11-6
variación de presión, 11-6
(*véase también* ,Intercambiadores de calor; Operaciones unitarias, control de las)
Intercambiadores de calor de Teflón 11-26
Intercambiadores de calor de tubo y casco, 11-3 a 11-20
(*véase también* Intercambiadores de calor)
Intercambiadores de calor con tubos de bayoneta, 11-24
Intercambiadores enfriados por aire, 11-27 a 11-28
cámaras de humidificación, 11-30
cara, velocidad de la, 11-28
condensadores:
aéreos, 11-30
de vapor, 11-31
control de flujo de aire, 11-30
costos de los, 11-31
diseño de:
aire forzado, 11-27
consideraciones para el, 11-31 a 11-32
tiro inducido, 11-27
enfriadores ajustados, 11-31
enfriamiento por evaporación, 11-30
entubado de, 11-28
haces de tubos en, 11-28
recirculación de aire, 11-30
velocidad de la cara, 11-27
Intercambiadores de superficie raspada, 11-26 a 11-27
Intercambiadores tipo placa, 11-23 a 11-24
de aleta de placa con soldadura fuerte, 11-24
en espiral, 11-24
de placas y marcos, 11-22
superficie de placa aleta y tubo, 11-24
Intercambiadores de tubo doble, 11-21
Intercambiadores de tubo en espiral, 11-24 a 11-25
Intercambio iónico, 16-5 a 16-52
aplicaciones del, 16-5 a 16-6
automatización de los intercambiadores, 19-48
continuo y casi continuo, 19-48 a 19-50
cromatografía, 16-40 a 16-43
curvas de rompimiento, 16-16 a 16-43
Donnan, elevación de, 16-17
equilibrio, 16-10 a 16-18
en sistemas multivariantes, 16-15 a 16-16
equipo para, 19-45 a 19-50
intermitente, 16-49 a 16-50
lecho mixto, 16-37, 16-45 a 16-46
lechos en movimiento, 16-52
multicomponente, 16-47 a 16-49
Asahi, proceso, 19-44
columna característica, 19-46
columnas a contracorriente, 19-48 a 19-50
costos del, 19-50
datos para diseño de lecho fijo, 19-46
Higgins, diseño de, 19-48
regeneración a contraflujo, 19-47
operaciones de, 19-45 a 19-46
operaciones cíclicas en el, 16-38 a 16-39
resinas:
quelatantes, 16-6
transferencia de electrones, 16-6
variancia (grados de libertad), 16-11
(*véase también* Sorción)
Interés, 25-10 a 25-11
compuesto anual, 25-10
compuesto continuo, 25-10
compuesto a intervalo corto, 25-10
simple, 25-10
Interés compuesto, factores de, 1-29 a 1-30
Interés, factores del, 1-29 a 1-30
Intermitentes:
evaporadores, 11-41
molinos de bolas, 8-16
reactores químicos, 4-28
International Practical Temperature, Escala de, 22-35
International Standards Organization, serie de cribas de prueba, 21-19
Interpolación, 2-67 a 2-69
diferencias hacia adelante, 2-68
inversa, 2-69
Lagrange, fórmulas de, 2-69
lineal, 2-67
de orden superior, 2-68
Interpolación lineal, 2-67
Intersecciones de la tangente, método de las, 4-71
Intervalo azeotrópico, 13-67 a 13-68
Inundación:
empaques de torres, 5-62
en extractores de líquidos, 21-78
de películas líquidas, 5-66 a 5-67
tubos verticales, 5-66 a 5-67
Inventario, evaluación y control del, 25-51 a 25-58
efecto sobre el ingreso y las utilidades, 25-51 a 25-52
Inversión, 25-5 a 25-40
(*véase también* Inflación; Interés; Rentabilidad)
Isobutano, propiedades termodinámicas del, 3-243
Isotermas:
definición de las, 16-11 a 16-12
monovariantes, 16-12 a 16-15
bilineales, 16-13
de Freundlich, 16-14
de Langmuir, 16-12 a 16-14

- (*véase también* Equilibrio(s)
- Isótopos, separación de, 17-72 a 17-73

- Jet Sizer, 21-25
- Joule, ley de, 9-61
- Joule-Thomson, efecto de, 3-131 a 3-134
  - otras referencias para los coeficientes del, 3-131
- Juntas:
  - de anillo, 6-37
  - biselada, 6-37
  - de entubado, 6-55
    - de ajuste abocinado, 6-55
    - de ajuste por compresión, 6-55
    - de ajuste tipo dentado, 6-55
    - con sello de anillo en O, 6-55
  - de expansión (*véase* Expansión, juntas de)
  - rosca cónica de tubería, 6-47
    - figura, 6-47
  - a tope, 6-37
  - de tubería, 6-47
    - de abrazadera en V, 6-54
    - con anillo de sello, 6-54
    - colada, 6-53
    - de cuello empacado, 6-53
    - embridada, 6-48
    - embutida, 6-53
    - estriada, 6-54
    - expandida, 6-53 a 6-54
    - roscada, 6-47
    - con sello de presión, 6-55
    - soldada, 6-82
    - de soldadura fuerte, 6-56
    - de soldadura de plata, 6-56
    - de unión, 6-47
  - de tubo laminado, 11-13
  - para tubo soldado, 11-13
- Jury, problema de, 2-8

- K, correlaciones de los valores de, 13-17 a 13-23
  - Benedict-Webb-Rubin, 13-18 a 13-20
  - Gmehling-Liu-Prausnitz, ecuación de, 13-20 a 13-21
  - Margules, 13-21 a 13-22
  - nomogramas, 13-17 a 13-19
  - Peng-Robinson, 13-19
  - Raoult, ley de, 13-23
  - Redlich-Kwong, ecuación de, 13-19
  - Soave, ecuación de, 13-19
  - Starling, ecuación de, 13-20
  - van Laar, ecuación de, 13-21 a 13-22
  - Wilson, ecuación de, 13-21 a 13-22
- K, determinación de los valores, 4-89
- Karbate, separadores de líneas, 18-83
- Karl-Fisher, método de, para mediciones de humedad, 22-54
- Karr, torre de placas de émbolo, 21-86
- Kaye, fotosedimentomedidor de, 8-8
- Kellogg, gráficas de, 13-17 a 13-19
- Kelvin, ley de, 17-46
- Kick, ley de la energía de, 8-13
- Kirchhoff, ley de, 10-57
- Kireev, ecuación de, 13-70
- Knudsen, número de, 5-36
- Koch Kascade, torre de, 21-81 a 21-82
- Koppers-Totzek, gasificador de, 9-25
  - (*véase también* Carbón mineral, gasificación del)
- Kozeny-Carman, ecuación de, 20-110
- Kremser, ecuación de, 15-17
  - solución gráfica, 15-17
- Kremser, método de, 13-43
- Kuenen, coeficiente de, 14-6 a 14-7
- Kühni, torre de, 21-86
- Kunii-Levenspiel, correlación de, 9-54
- Kutateladse-Zuber, relación de, 10-24

- Ladrillo refractario como material de construcción, 23-68
  - resistencia química del, 23-71
  - propiedades del, 23-71
- Ladrillos porosos, 18-67 a 18-68
  - características de los, tabla, 18-68
- Lagrange, desigualdad de, 2-11
- Lagrange, fórmulas de interpolación, 2-69
- Laguerre, ecuación de, 2-48
- Lagunas, 26-45
- Laminado de tubos, número de orificios en, tablas, 11-14 a 11-16
- Lantern, anillos, 6-38
- Laplace, ecuación de, 2-8, 2-48 a 2-51
- Laplace, transformada de, 2-55 a 2-56
  - en control automático, 22-6
- Largo de entrada del tubo, 5-39
- Laurent, serie de potencia de, 2-19
- Lechadas:
  - extracción de las, 21-74
  - muestreo de, 21-11 a 21-12
- Lechos fijos:
  - caída de presión en, 5-59
  - de flujo radial, 16-34 a 16-36
  - método de diseño para, 16-6 a 16-9
- Lechos fluidificados, 9-49 a 9-55, 20-67
  - adsorción-desorción en, 20-83
  - altura del lecho, 20-69
  - altura libre de transporte (TDH), 9-55
  - aplicaciones de los, 20-79
  - Arquímedes, número de, 9-58
  - arrastre en los, 20-70 a 20-71
  - burbujeo (turbulento), 20-73
  - caída de presión del fluido, 4-41
  - catalíticos, 20-79 a 20-80
  - circulación (rápida), 20-74
  - combustión, 20-82 a 20-83
    - de combustibles sólidos, 9-49 a 9-55
      - atmosférica (AFBC) Atmosferic Fluidized Bed Combustion, 9-55
      - a presión (PFBC) Pressurized Fluidized Bed Combustion, 9-55
  - control de temperatura, 20-75
  - descarga de sólidos, 20-76 a 20-77
    - brazo de sello, 20-76
    - tanque de inmersión, 20-77
  - diagramas de fase, 20-67
  - diseño de los, 20-69
  - distribuidor de
  - eficiencia de co
  - emisiones de ó
  - escalamiento, 2
  - expansión del l
  - factores de forr
  - fluidizador ind
  - gasificador Wi
  - instrumentació
  - Kunii-Levensp
  - margen libre, 2
  - medición de:
    - flujo, 20-79
    - presión, 20-
    - temperatur
  - mezclado:
    - de gases, 2(
    - de sólidos,
  - no catalíticos,
  - opciones de di
  - reactores para
  - reactores quím
  - recipiente de r
  - recubrimiento
  - reducción de t
  - remoción de d
  - secado en, 20-
  - separación de
    - brazo de se
    - ciclón, 20-
  - sistemas gas-s
  - sólidos:
    - alimentadc
    - control de
    - reciclaje, 2
    - tipos de, 2(
  - tipos de equip
  - transferencia
  - transferencia
  - tratamiento té
  - velocidad de l
  - velocidad mír
- Lechos en movi
  - para procesos
  - para sólidos,
- Lechos de sólid
  - caída de presi
  - dinámica del
  - distribuidores
  - empaques par
  - espacios vací
  - factor de forn
  - fluidificados,
  - fluido, dinám
  - lechos fijos o
  - medio porosc
- Lee y Kesler, tal
- Legendre, ecuac
- Leibnitz, regla c
- Lemniscata, 2-2
- Lestou-Stiel, co

- distribuidor de gas en los, 20-70 a 20-72
- eficiencia de combustión del carbón, 9-52 a 9-53
- emisiones de óxidos de nitrógeno, 9-54
- escalamiento, 20-73 a 20-74
- expansión del lecho en fluidificación, 9-55
- factores de forma para varios materiales, tabla, 9-54
- fluidizador indirecto para transferencia de calor, 11-52
- gasificador Winkler, 9-25
- instrumentación, 20-78 a 20-79
- Kunii-Levenspiel, correlación de, 9-54
- margen libre, 20-71
- medición de:
  - flujo, 20-79
  - presión, 20-78 a 20-79
  - temperatura, 20-78
- mezclado:
  - de gases, 20-75
  - de sólidos, 20-75
- no catalíticos, 20-80 a 20-83
- opciones de diseño para los, 9-55
- reactores para gasificación de carbón, 9-24
- reactores químicos, 4-28
- recipiente de reacción, 20-69
- recubrimiento, 20-84
- reducción de tamaño, 20-75
- remoción de dióxido de azufre, 9-53 a 9-54
- secado en, 20-83
- separación de polvo, 20-77 a 20-78
  - brazo de sellado, 20-77
  - ciclón, 20-77
- sistemas gas-sólido, 20-68 a 20-70
- sólidos:
  - alimentadores, 20-75 a 20-76
  - control de flujo, 20-75 a 20-76
  - reciclaje, 20-76
  - tipos de, 20-68
- tipos de equipo, 20-68 a 20-70
- transferencia de calor en, 9-55, 20-74 a 20-75
- transferencia de masa, 20-74 a 20-75
- tratamiento térmico, 20-84 a 20-85
- velocidad de fluidificación, 20-67
- velocidad mínima de fluidificación, 9-55

Lechos en movimiento:
- para procesos de sorción, 16-50
- para sólidos, 11-53

Lechos de sólidos:
- caída de presión, 5-59 a 5-62
- dinámica del fluido, 5-59 a 5-62
- distribuidores, 5-57
- empaques para torres, 5-64
- espacios vacíos reales de, 5-61
- factor de forma, 5-60
- fluidificados, 5-61
- fluido, dinámica del, 5-59 a 5-62
- lechos fijos o sólidos granulares, 5-59 a 5-60
- medio poroso (*véase* Medios porosos)

Lee y Kesler, tablas de la correlación de, gráfica, 4-77
Legendre, ecuación de, 2-48
Leibnitz, regla de, 2-53
Lemniscata, 2-23
Lestou-Stiel, correlación de viscosidad de, 3-328
Leva, correlación de, 18-25
Lewis-Randall, regla de, 4-66
Ley:
- de acción de masas, 4-90
- (*véanse también* las Leyes específicas)

Ley de energía de enlace, 8-13
Leyes exponenciales, 2-15
L'Hospital, teorema de, 2-31 a 2-32
Lightnin, torre mezcladora de, 21-84
Límites de funciones, 2-30
Límites para raíces reales, 2-17
Linde, ciclo de, 12-52 a 12-57
- sistema de columna doble, 12-58
- sistema de columna sencilla, 12-57

Liquid Dynamics, extractor, 21-90
Líquido(s), 21-60 a 21-62
- almacenamiento de, 6-110 a 6-116
- bombeo de, 6-4 a 6-6
- cálculo del coeficiente de difusión, 3-334 a 3-335
- cálculo de la densidad, 3-318 a 3-319
- compresibilidades de los, 3-143
- conductividad térmica, 3-297
  - cálculo de la, 3-332
- difusividades en, 3-303 a 3-304
- gotas de (*véase* Gotas)
- no miscibles:
  - contacto de, 21-62
  - creación de emulsión, 21-62
  - gotas sencillas inmersas en, 21-74 a 21-75
  - reacción de, 21-62
  - separación de, 21-62
  - transferencia de calor entre, 21-62
  - (*véase también* Mezclador(es), para líquidos no miscibles)
- tensión superficial, cálculo de la, 3-336 a 3-337

Líquido, equilibrio (*véase* Equilibrio(s) líquido líquido)
Líquido-gas, sistemas, 18-3
- características de los, tabla, 18-3

Líquido líquido, equilibrio (*véase* Equilibrio(s), líquido-líquido)
Líquido líquido, operaciones de, 21-62
- continuas, 21-76 a 21-77
  - transferencia de masa, 21-76, 21-78 a 21-80, 21-82
- en etapas, 21-63 a 21-74
  - equipo para, 21-64 a 21-74
  - transferencia de masa, 21-63
- (*véase también* Extracción líquido-líquido)

Líquido líquido, extracción (*véase* Extracción, líquido líquido)
Líquido sólido, procesamiento de (*véanse* Agitación; Agitadores; Mezclador(es))
Litio y aluminio, silicato de, 20-41
Litio, propiedades termodinámicas del, 3-244
Lixiviación, 19-54 a 19-58
- continua de sólidos dispersos, 19-55
- definición de la, 19-54
- equipo para, 19-54 a 19-56
- extractores:
  - de banda de Smet, 19-55
  - Bonotto, 19-56
  - cálculos para determinar las dimensiones, 19-56 a 19-57
  - de inmersión total de Hildebrant, 19-56
  - Kennedy, 19-55

Lurgi, de marco y banda de, 19-55
de placas verticales, 19-56
Rotocel, 19-55
tipo Bollman, 19-54 a 19-55
de transportador de tornillo, 19-56
intermitente en tanques agitados, 19-55
mecanismo de la, 19-54
métodos de operación en, 19-54
percoladores:
de banda sinfín, 19-55
continuos, 19-54
intermitentes, 19-54
procesos de:
condiciones de operación, 19-56
selección y diseño de los, 19-56 a 19-57
de sólidos dispersos, 19-55
en tanques Pachuca, 19-55 a 19-56
tanques para:
agitados por impulsor, 19-55
sedimentación por gravedad, 19-55
Ljungstrom, calentador de aire, 9-102
Logaritmos, 2-10 a 2-43
London, fuerzas de, 21-39
Lubricación de turbinas, 24-40
Lubricidad, 21-4
Lugar geométrico de la raíz para el análisis de los sistemas de control, 22-26
Lurgi, combustor de lecho fluidificado de, 20-82
Lurgi, extractor de, 21-74
Lurgi, gasificador de, 9-24
(*véase* Carbón mineral, gasificación del)
Luwesta, extractor de, 21-90

Maclaurin, prueba de la integral de, 2-39
Maclaurin, serie de, 2-40
Mach, número de, 5-6, 2-123
Madera:
para equipo químico, 23-71
como material de construcción, 23-56
Magnesio, cloruro de, datos de corrosión del, 23-30 a 23-32
Magnesio, óxido de, 20-41
Magnesio, sulfato de, datos de corrosión del, 23-30 a 23-32
Magnetización, curvas de, 21-38
Malesinski, ecuación de, 13-69
Malla(s), 21-14 a 21-15
abertura de las, 21-15
de agitación mecánica, 21-16
área abierta de las, 21-15
de barras, 21-18
caída de presión, 5-44
capacidad, 21-19
gráfica, 21-19
factor del área abierta, gráfica, 21-20
coeficiente de descarga, 5-44
cribas de prueba, 21-20 a 21-21
eficiencia, 21-18
espesor constante de la malla, 21-20
giratorias, 21-17 a 21-18
giratorias o de zaranda, 21-17
de movimiento alternativo, 21-17
oscilantes, 21-17
placas perforadas, 21-18
rejillas, 21-15
planas, 21-15
vibratorias, 21-15
selección de las, 21-18
superficies de las, 21-18
telas, 21-18
aberturas comparativas de las, 21-18
(*véase* Cribas)
vibratorias, 21-16 a 21-17
eléctricas, 21-17
mecánicas, 21-16 a 21-17
Manejo de desperdicios:
contaminación del aire (*véase* Contaminación del aire)
desperdicios sólidos (*véase* Desperdicios de sólidos)
manejo de agua de desperdicio (*véase* Contaminación del agua)
planeación social para el, 26-3 a 26-4
estratégica, 26-3
Manganeso, 2-40
Mannheim, hornos de, 20-52
Manning, fórmula de, 5-31
Mano de obra de operación, costo de la, 25-61
Manómetros:
de columna de líquidos, 5-6 a 5-7
abiertos o diferenciales, 5-6 a 5-7
de tubo en U, (*véase también* Tubos en U)
diámetro del tubo para los, 5-7
error capilar en los, 5-7
Máquinas de combustión interna, 24-16 a 24-19
arranque, 24-18
características del combustible para las, 24-18
características de diseño de, 24-16
características de operación, 24-17
confiabilidad de, 24-17
costos de, 24-18
instalación de las, 24-18
mantenimiento de las, 24-17
recuperación de calor, 24-17
sobrecarga, 24-17
tamaño de la máquina, 24-16
valor nominal de la máquina, 24-16 a 24-17
Máquinas de movimiento alternativo, 24-15 a 24-20
generador de gas de pistón libre, 24-19 a 24-20
características de diseño del, 24-19
características de operación del, 24-19
combustibles, 24-19
instalación, 24-19
recuperación de calor, 24-19
máquinas de combustión interna, 24-16 a 24-18
arranque, 24-17
características del combustible para las, 24-17
características de diseño de las, 24-16
características de operación de las, 24-17
confiabilidad de las, 24-17
costo de las, 24-17 a 24-18
instalación de las, 24-17 a 24-18
mantenimiento de las, 24-17
recuperación de calor, 24-17
sobrecarga, 24-17
tamaño del motor, 24-16
potencia nomi
máquinas de vapo
de expansión,
sin expansión,
Máquinas de vapor,
con expansión, 24
sin expansión, 24-
Marangoni, efecto d
Margules, ecuación
Martilleo de agua, 5
Martin, diámetro de
Masa velocidad, 5-5
superficial, 5-5
Materiales de const
para bombas, 6-7
metales y aleacio
para recipientes,
para recipientes
resistencia a la c
selección de los:
a altas tempe
a bajas tempe
para sistemas de
(*véase también*
aleacione
Materiales de cons
Circona, 23-71
contenido de alu
contenido de cr
escurrimiento,
grafito, 23-71
ladrillos con al
ladrillos de carb
ladrillos de cror
ladrillos de mag
ladrillos de mul
ladrillos refract
ladrillos refract
ladrillos de síli
ruptura por esf
Materiales de con
Materiales higros
Materias primas,
Matrices, álgebra
cálculos, 2-58
ecuación lineal
derivación, 2-
eliminación ga
factorización
forma escalon
giro en la elim
integración, 2-
inversa de una
matriz adjunta
matriz de perm
matrices cuad
matrices elem
multiplicació
multiplicació
operaciones e
normas de los

potencia nominal del motor, 24-16 a 24-17
máquinas de vapor, 24-15 a 24-16
de expansión, 24-15 a 24-16
sin expansión, 24-15
Máquinas de vapor, 24-15 a 24-16
con expansión, 24-15 a 24-16
sin expansión, 24-15
Marangoni, efecto de, 18-95
Margules, ecuación de, 4-83
Martilleo de agua, 5-68
Martin, diámetro de, 8-7
Masa velocidad, 5-5
superficial, 5-5
Materiales de construcción, 23-3 a 23-72
para bombas, 6-7
metales y aleaciones, propiedades de los, 23-42 a 23-56
para recipientes, 6-94 a 6-95
para recipientes a presión, 6-116
resistencia a la corrosión, 23-18 a 23-40
selección de los:
a altas temperaturas, 23-63 a 23-72
a bajas temperaturas, 12-51 a 12-52
para sistemas de tubería, 6-65 a 6-71
(*véase también* Corrosión; Hule; Madera; Metales y aleaciones; Plásticos; Resistencia química)
Materiales de construcción para alta temperatura:
Circona, 23-71
contenido de aluminio, 23-64
contenido de cromo, 23-64
escurrimiento, 23-63, 23-72
grafito, 23-71
ladrillos con alto contenido de alúmina, 23-68, 23-71
ladrillos de carburo de silicio, 23-71
ladrillos de cromo, 23-71
ladrillos de magnesita, 23-71
ladrillos de mullita, 23-71
ladrillos refractarios, 23-71
ladrillos refractarios aisladores, 23-70 a 23-71
ladrillos de sílice, 23-69 a 23-71
ruptura por esfuerzo, 23-62, 23-72
Materiales de construcción para temperaturas bajas, 23-56 a 23-62
Materiales higroscópicos, definición de los, 20-5
Materias primas, costo de las, 25-60
Matrices, álgebra de, 2-57 a 2-61
cálculos, 2-58
ecuación lineal en forma de matriz, 2-58
derivación, 2-58
eliminación gaussiana, 2-61
factorización LU, 2-60
forma escalonada, 2-59
giro en la eliminación gaussiana, 2-61
integración, 2-56
inversa de una matriz, 2-56
matriz adjunta, 2-56
matriz de permutación, 2-59
matrices cuadradas, 2-56
matrices elementales, 2-59
multiplicación, 2-57 a 2-58
multiplicación escalar, 2-57
operaciones en hilera, 2-59
normas de los vectores y matrices, 2-59
suma, 2-57
sustracción, 2-57
transposición, 2-57
Maxwell, ecuaciones de, 4-61
McCabe-Thiele, método de, 13-28 a 13-36
construcción de la etapa de equilibrio, 13-31 a 13-33
construcción total de la columna, 13-31 a 13-35
etapas mínimas, 13-35
localización de la etapa de alimentación, 13-35
q, línea, 13-30
punto de intersección, 13-35
recalentadores y condensadores intermedios, 13-35
reflujo mínimo, 13-35 a 13-36
relación de reflujo interno, 13-30
relación de reflujo externo, 13-30
relación óptima de reflujo, 13-35
sobreflujo molar constante, 13-29
McNelly, ecuación de, 10-23
Mecanismos de enlace, 8-69
enlace de líquidos móviles, 8-69
fuerzas:
electrostática, 8-69
intermolecular, 8-69
interconexión mecánica, 8-69
puentes:
líquido inmóvil, 8-69
sólidos, 8-69
Media:
aritmética, 2-15
armónica, 2-15
factor de corrección de la diferencia media de temperatura, 11-32
geométrica, 2-15
Media, armónica, 2-15
Media geométrica, 2-15
Medición de humedad:
método de:
calor de sorción, 22-56
capacitancia, 22-56
conductancia, 22-56
electrolítico, 22-55
de Karl Fischer, 22-55
piezoeléctrico, 22-55
psicrométrico, 22-56
punto de rocío, 22-54
de resistencia, 22-56
de transición de la fase salina, 22-55
Medición de nivel:
consistencia y viscosidad, 22-44
dispositivos activados con flotador, 22-44
acoplado magnéticamente, 22-45
mecanismos de palanca y eje, 22-44
medidor de flotador de cadena o cinta, 22-44
dispositivos de carga, 22-48 a 22-49
en recipientes abiertos, 22-46
en recipientes a presión, 22-46
servicio de líquidos en ebullición, 22-47 a 22-48
sistemas de tubo de burbujeo, 22-47
dispositivos del desplazador, 22-46 a 22-48
acoplado magnéticamente, 22-47
tubo de flexión, 22-47

tubo de par de torsión, 22-45 a 22-47
dispositivos visuales, 22-43
vidrio de nivel, 22-43
métodos eléctricos, 22-49
métodos sónicos, 22-49
métodos térmicos, 22-49
Medición de presión, 5-8, 22-39 a 22-43
métodos de columna de líquido, 22-39 a 22-40
métodos eléctricos, 22-42 a 22-43
extensómetros, 22-41 a 22-43
transductores piezoeléctricos, 22-43
transductores piezoresistivos, 22-43
métodos de elemento elástico, 22-40 a 22-42
Bourdon, elementos de tubo, 22-40
elemento de fuelles, 22-40
elementos de diafragma, 22-41 a 22-43
estándares y calibración, 22-39
Mediciones:
analizadores del índice de refracción, 22-51
de conductividad térmica, 22-51 a 22-52
de densidad, 22-49 a 22-51
de flujo, 22-43
medidores de flujo por derramamiento del vórtice, 22-43
medidores ultrasónicos de flujo, 22-43
de gravedad específica, 22-48 a 22-52
de humedad (*véase* Medición de humedad)
de nivel (*véase* Medición de nivel)
de partículas (*véase* Partículas, medición de las)
de presión (*véase* Medición de presión)
de temperatura (*véase* Temperatura, medición de)
de viscosidad y consistencia, 22-51
Mediciones conductométricas sin electrodos, 22-53
Medidor de presión tipo tubo Bourdon, 5-9
Medidores de área, 5-20
principios de, 5-20
rotámetros, 5-20
Medidores de codo, 5-18 a 5-20
Medidores de flujo de masa, 5-18 a 5-21
deductivos, 5-21
de flujo axial y momento transversal, 5-21
principios de los, 5-20 a 5-21
Medidor(es) de presión, 5-6 a 5-9
calibración, 5-9
mecánicos, 5-8
Bourdon, tubo, 5-9
condiciones de uso, 5-9
diafragma, 5-9
multiplicación, 5-7 a 5-9
resistencia, 5-7 a 5-8
Medidores de tiro, 5-7 a 5-8
Medidores de velocidad, 5-10 a 5-13
anemómetros, 5-11 a 5-13
tubos de pitot, 5-10 a 5-13
Medios filtrantes, 19-80 a 19-81
características de los, 19-81
efecto de los, sobre la filtración, 19-76
fieltros comprimidos, 19-80
guata de algodón, 19-80
de lechos granulares de partícula sólidos, 19-80 a 19-81
membranas de polímero, 19-80
papel filtro, 19-80
poros rígidos, 19-80
telas:
de fibras tejidas, 19-80
metálicas o de malla, 19-80
no tejidas, 19-80
Medios porosos:
caída de presión, 5-63
coeficiente de permeabilidad, 5-63
Darcy, ecuación de, 5-63
Forchheimer, ecuación de, 5-63
Membranas de separación, 21-71 a 21-72
Mercurio, 20-42
calor:
capacidad de, 3-159
latente, 3-145
compresibilidad del, 3-143
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-97
expansión térmica, 3-130
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-62
propiedades físicas del, 3-19
propiedades termodinámicas del, 3-245 a 3-246
relación de calor específico, 3-173
viscosidad del, 3-292 a 3-297
Mesa acuífera, 5-13
Metales y aleaciones:
conductividad térmica de los, 3-306 a 3-207
fatiga en los, 6-124 a 6-125
como materiales de construcción para alta temperatura, 23-54
aleaciones comerciales, tabla de las, 23-72
aluminio, 23-64
efecto del escurrimiento, 23-72
ladrillo refractario, 23-68
ladrillos de alta alúmina, 23-68
ladrillos de cromo, 23-70
ladrillos de magnesita, 23-70
ladrillos de sílice, 23-68 a 23-69
propiedades de ruptura, 23-72
refractarios, 23-67
refractarios monolíticos moldeables, 23-72
como materiales de construcción para baja temperatura, 23-56 a 23-62
aceros inoxidables, 23-62
aluminio, 23-62
cobre y sus aleaciones, 23-62
módulos de elasticidad, tabla, 6-98
propiedades físicas y mecánicas de los, 23-41
resistencia a la corrosión, 23-18 a 23-40
Metano, 12-52
calor:
capacidad de, 3-156
de combustión, 3-195
específico, 3-169
de evaporación, 3-149
de formación, 3-180
latente, 3-143
compresibilidad del, 3-140
conductividad térmica, 3-291
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-18
Joule-Thomson, c
Prandtl, número d
presión de vapor d
propiedades física
propiedades term
relación de calor e
solubilidad en agu
viscosidad del, 3-
Metanol:
datos de corrosió
propiedades term
Metanol agua, 12-5
destilación del sis
Metilamina, propie
Metileno, cloruro d
propiedades term
Metilo, cloruro de:
calor:
específico, 3-
de evaporació
conductividad té
constantes crític
densidad del, 3-
Prandtl, número
presión de vapo
propiedades físi
propiedades ter
viscosidad del,
Metilo, formato de
Metil etil cetona (
Método diferencia
química,
Método integral p
química,
Métodos aproxim
Métodos de integr
aproximacione
expansión por s
fórmula directa
fracciones parc
integración cur
integrales de lí
sustitución alg
sustitución trig
Métodos numéric
Métodos de pertu
colocación ort
método de las
Mezclado, 21-4 a
de área consta
de pastas, 19-1
potencia pa
calentamiento
carga electros
contaminació
continuo, 21-1
enfriamiento
equipo para el
[*véase tam*
formación de

ratura, 23-54

energía libre, 3-180
Joule-Thomson, coeficiente de, 3-134
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-75
propiedades físicas del, 3-44
propiedades termodinámicas del, 3-247
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-126
viscosidad del, 3-291, 3-293
Metanol:
datos de corrosión, 23-30 a 23-32
propiedades termodinámicas del, 3-248 a 3-249
Metanol agua, 12-52
destilación del sistema, 18-18
Metilamina, propiedades termodinámicas de la, 3-249
Metileno, cloruro de, 12-49 a 12-50
propiedades termodinámicas del, 3-251
Metilo, cloruro de:
calor:
específico, 3-168
de evaporación, 3-151 a 3-153
conductividad térmica, 3-297
constantes críticas, 3-135
densidad del, 3-98
Prandtl, número de, 3-300
presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-76
propiedades físicas del, 3-44
propiedades termodinámicas del, 3-250 a 3-251
viscosidad del, 3-293 a 3-295
Metilo, formato de, propiedades termodinámicas del, 3-251
Metil etil cetona (MEK), 13-73
Método diferencial para derivación de la ecuación de velocidad química, 4-21
Método integral para la obtención de la ecuación de velocidad química, 4-21
Métodos aproximados, 2-62 a 2-78
Métodos de integración, 2-33 a 2-35
aproximaciones numéricas, 2-35
expansión por series, 2-34
fórmula directa, 2-34
fracciones parciales, 2-34
integración curvilineal, 2-44
integrales de líneas, 2-44
sustitución algebraica, 2-33
sustitución trigonométrica, 2-34
Métodos numéricos en adsorción:
Métodos de perturbación, 2-65 a 2-66
colocación ortogonal, 16-36
método de las características, 16-36
Mezclado, 21-4 a 21-11
de área constante, 6-34
de pastas, 19-15 a 19-25
potencia para el, 19-18
calentamiento del, 21-10
carga electrostática en el, 21-8
contaminación del producto, 21-10
continuo, 21-11
enfriamiento del, 21-10
equipo para el, 21-4 a 21-10
[*véase también* Mezclador(es)]
formación de polvo en el, 21-8
por impacto, 21-7
intermitente, 19-12, 21-4 a 21-10
de materiales viscosos, 19-16 a 19-28
mecanismos de, 21-5
pruebas piloto, 21-10
sólido-sólido, 21-4 a 21-10
métodos de adición del líquido, 21-10
objetivos del, 21-4
problemas de segregación en el, 21-5
propiedades que afectan el, 21-4
tiempo, 21-8
uniformidad del, 19-12, 21-4, 21-7
en recipientes agitados con flujo continuo, 19-12
(*véase también* Agitación)
Mezclador de artesa, 21-5
Mezclador asentador, equipo, 21-72 a 21-74
Mezclador de banda, 21-5 a 21-8
Mezclador con casco y dispositivo interno giratorio, 21-7, 21-8
Mezclador de casco estacionario, 21-7, 21-9
Mezclador pulverizador, 21-5 a 21-6, 21-8
de bandeja, 19-19 a 19-20
Mezclador vertical de tornillo, 21-7
Mezclador de volteo, 21-5, 21-8
Mezclador(es):
aglomeradores, 8-78
amasador de brazo doble, 19-16
de arado, 19-19
artesa y tornillo, 19-23
de aspas:
de curva simple, 19-17
de dispersión, 19-17
de rótula doble, 19-17
sigma, 19-16
superpuestas, 19-16
superpuestas de enjuagado múltiple (MWOL), 19-17
tangenciales, 19-16
Baker Perkins Ko-Kneader, 19-21
Baker Perkins Rotofeed, 19-21
Banbury, 19-18
de banda, 21-7
calentamiento de los, 21-10
características de funcionamiento de los, 21-8 a 21-10
de casco y rotación del dispositivo interno, 21-7 a 21-8
de casco estacionario (de artesa), 21-7
de cono, 19-19
continuo de Farrel, 19-23
continuo de tornillo doble, 19-23 a 19-24
de chorro, 19-11 a 19-12
desgaste de los, 21-8
enfriamiento de los, 21-10
extrusores de tornillo sencillo, 19-20
flexibilidad de los, 21-10
intensivos, 19-18
intermitentes con descarga de tornillo, 19-18
Kneadermaster, 19-23
limpieza de los, 21-8
para líquidos no miscibles, 21-62
bombas, 21-64
de chorro, 21-63
de flujo o en línea, 21-62
inyectores, 21-63

mezclador en línea con agitación, 21-64
orificios, 21-63
recipientes agitados, 21-65
toberas, 21-63
tubos empacados, 21-64
válvulas, 21-63
malaxadoras, 19-23
mezcladores de banda, 19-19
mezcladores de masa, 19-19
molinos de dos rodillos, 19-18
molinos de rodillos, 19-18
molinos de tres rodillos, 19-18 a 19-19
sin movimiento, 19-23
para pastas, 19-15 a 19-25
distribuciones de los tiempos de residencia, 19-26
escalamiento de los, 19-26
preparación y adición de materiales, 19-27
selección del equipo, 19-27
transferencia de calor en los, 19-26 a 19-27
Prodex-Henschel, 19-20
para propósitos múltiples, 19-24 a 19-25
pulverizadores, 21-5 a 21-6, 21-8
de bandeja, 19-21 a 19-22
requerimientos de potencia de los, 21-8
tabla, 2-9
Rietz, extrusor, 19-22
de rotor doble, 21-7
de rotor sencillo, 21-7
selección de los, 21-10
sólido-sólido, 21-5 a 21-11
de tanques cambiables, 19-15
de tanque estacionario, 19-15
de aspa helicoidal, 19-16
de barra cizalladora, 19-15 a 19-16
de compuerta, 19-15
de tornillo, 19-19
de tornillo vertical, 21-7
Transfer Mix, 19-21
de turbina, 21-7
al vacío, 21-10
(*véanse también* Agitadores; Mezclado)
volteador, 21-7
Welex-Papenmeir, 19-18
Mezcladores asentadores, extractores, 21-72 a 21-74
eficiencias globales de las etapas, 21-74
Mezcladores de rotor doble, 21-5
Mezcladores de un solo rotor, 21-7
Mezcladores de turbina, 21-7
Michaelis-Menten, cinética de, 27-19 a 27-20
Mínimos cuadrados, método de los, 2-70
lineal simple, 2-110 a 2-113
Minkowski, desigualdad de, 2-12
Missenard, constantes de, 3-331 a 3-332
Modelado de los procesos biológicos, 27-15 a 27-18
análisis matemático, 27-16 a 27-17
cultivo continuo, 27-16
reciclaje, 27-17
Modelos dinámicos (*véase* Control, modelos de)
Modelos de población, 2-86
Modelos del proceso (*véase* Control, modelos de)
Módulo de elasticidad:
metales y aleaciones, 23-47 a 23-52
para metales, tabla, 6-96
para no metales, tabla, 6-103
para plásticos, 23-56
Módulos, 2-42
Moh, escala de dureza de, 8-11
Molibilidad, 21-4
Molibilidad, índice de, 8-11, 9-7, 9-82
Molienda:
de artesa de ladrillería, 8-57
de almidón, 8-56
de cal, 8-62 a 8-65
de carbón, 8-65
de cemento, 8-62 a 8-65
en circuito cerrado o clinker, 8-64
procedimiento en húmedo, 8-63 a 8-64
procedimiento en seco, 8-62 a 8-65
de colores y pigmentos, 8-66
de coque, 8-65
de fertilizantes, 8-62
de fosfatos, 8-62
de harina y alimentos, 8-55 a 8-56
de jabones, 8-67
de minerales, 8-56 a 8-62
arcillas y caolines, 8-57
asbesto, 8-59
carbonatos, 8-58 a 8-59
feldespato, 8-59
mica, 8-59
minerales no metálicos, 8-56
minerales metalíferos, 8-56
piedra y agregados triturados, 8-60
refractarios, 8-60
sílice, 8-59
sulfatos, 8-58 a 8-59
talco y saponita, 8-58
de óxidos de plomo, 8-66
de polímeros orgánicos, 8-67 a 8-69
de productos de carbón, 8-66
de productos químicos, 8-66 a 8-67
de soya y tortas de soya, 8-56
(*véase también* Reducción de tamaño de partículas)
de yeso, 8-62 a 8-65
Molienda de alimentos, 8-55 a 8-56
Molienda de almidón, 8-56
Molienda de arcilla, 8-57
Molienda de asbestos, 8-59
Molienda de cal, 8-62 a 8-65
Molienda del Caolín, 8-57
Molienda del carbonato, 8-58 a 8-59
Molienda del cemento, 8-60
Molienda electrohidráulica, 8-55
Molienda, equipo de, 8-18 a 8-69
Attritor, 8-39
de bolas no rotatorios (*véase* no rotatorios *más adelante*)
clasificadores del tamaño de partícula, 8-41 a 8-43
clasificadores en seco, 8-41 a 8-42
clasificadores en húmedo, 8-42 a 8-43
funcionamiento de los, 8-42
de coloides (*véase* molinos de dispersiones y coloides)
de frotamiento por discos, 8-51 a 8-56
giratorios, 8-60
guía de selecció
métodos nuevos
efectos térmi
para evitar la
molinos espe
trituración el
trituración co
trituración p
molienda planet
molino de artes
molino del Bur
molino rotatori
molinos agitado
molinos de anill
con clasifica
sin clasifica
con clasifica
molinos de bola
cojinetes de
continuos, 8
molinos de bol
funcionami
molinos de cho
Jet-O-Mize
Micronizer,
molinos de
pulverizado
pulverizado
molinos de ch
molinos de dis
molinos de dis
homogeniz
molino Cha
molino de c
molino Ma
molino Mo
molino Pre
molinos de fro
molinos de gui
molinos de ma
con clasific
sin clasific
molinos(s) de
molinos de vá
molinos Vibra
molinos vibra
molinos de vo
alimentado
alimentaci
capacidad,
carga de m
en cascada
en catarata
circuitos, 8
dimension
de los
eficiencias
funcionam
motor de i
parámetro

- giratorios, 8-60
- guía de selección, tabla, 8-24
- métodos nuevos, 8-54 a 8-55
  - efectos térmicos, 8-55
  - para evitar la reducción de tamaño, 8-54 a 8-55
  - molinos especiales de volteo, 8-55
  - trituración electrohidráulica, 8-55
  - trituración con explosivos, 8-55
  - trituración por tensión, 8-55
- molienda planetaria de bolas, 8-41
- molino de artesa de ladrillería, 8-56, 8-77
- molino del Bureau of Mines, 8-40
- molino rotatorio de impacto, 8-57
- molinos agitados, 8-39
- molinos de anillos y rodillos, 8-48 a 8-50, 8-57
  - con clasificación interna de aire, 8-49
  - sin clasificación interna de aire, 8-48 a 8-49
  - con clasificación interna de pantalla, 8-48
- molinos de bolas, 8-60, 8-63
  - cojinetes de bolas, 8-63
  - continuos, 8-55
- molinos de bolas no rotatorios, 8-39 a 8-41
  - funcionamiento de los, 8-40
- molinos de chorro o hidráulicos, 8-52 a 8-53
  - Jet-O-Mizer, 8-54
  - Micronizer, 8-52 a 8-53
  - molinos de chorro de aire Trost, 8-54
  - pulverizador de chorro, 8-54
  - pulverizador de chorro Majac, 8-53
- molinos de chorro (*véase* molinos de chorro o hidráulicos *arriba*)
- molinos de disco doble, 8-51
- molinos de dispersiones y coloides, 8-51 a 8-52
  - homogenizador-dispersador Tri Homo, 8-52
  - molino Charlotte, 8-52
  - molino de coloides Gaulin, 8-52
  - molino Manton-Gaulin, 8-52
  - molino Morehouse, 8-52
  - molino Premier, 8-52
- molinos de frotamiento Sprout-Waldron, 8-50
- molinos de guijarros, 8-57
- molinos de martillo, 8-55, 8-60, 8-63
  - con clasificadores internos de aire, 8-45 a 8-47
  - sin clasificadores internos de aire, 8-45
- molinos(s) de rodillos, 8-55
- molinos de vástago, 8-50
- molinos Vibracon, 8-40
- molinos vibratorios, 8-40, 8-45
- molinos de volteo, 8-34 a 8-39
  - alimentadores del molino, 8-36
  - alimentación y descarga, 8-36
  - capacidad, consumo de potencia, 8-37
  - carga de material y bolas, 8-36
  - en cascada, 8-35
  - en catarata, 8-35
  - circuitos, 8-35
  - dimensiones óptimas, 8-35
    - de los rodillos y bolas, 8-35
  - eficiencias, 8-36
  - funcionamiento del equipo de patentado, 8-37 a 8-39
  - motor de impulso, 8-37
  - parámetros del molino, 8-36
  - selección de los, 8-36
- de piedra o muelas, 8-51
- quebrantadoras de impacto, 8-30 a 8-33
  - cortadores y rajadores de precisión, 8-33
  - impactores de rotor, 8-30
  - molinos de jaula, 8-31
  - pretrituradores, 8-31
  - triturador de martillo, 8-30
- reductores de tamaño, tipos de, tabla, 8-24
- de rodillos calentados con vapor, 8-57
- de rodillos corrugados, 8-62
- de rodillos verticales, 8-63
- triturador Frigidisc, 8-51
- trituradores de bandeja, 8-33
  - de bandeja en seco Charmbers, 8-33
  - funcionamiento de los, 8-33
- trituradores giratorios, 8-24
  - de cono Symons Standard, 8-26
  - de etapas múltiples con reducción fina, 8-26
  - funcionamiento de los, 8-26
  - Gyra-Kone, 8-26
  - Hydrocone, 8-26
  - Kue Ken, 8-26
  - primarios, 8-26
  - secundarios, 8-26
  - Telsmith Gyrasphere, 8-26
- trituradores de impacto, 8-60
- trituradores de quijada, 8-23 a 8-25, 8-60
  - funcionamiento de los, 8-34
  - superior excéntrica, 8-24
  - tipo Blake, 8-23
  - tipo Dodge, 8-23
- trituradores de rodillos, 8-28 a 8-30
  - funcionamiento de los, 8-29
  - Koppers, 8-30
  - trituradores McNally, 8-29

Molienda de esteatita, 8-57
Molienda de feldespato, 8-59
Molienda de fosfato, 8-62
Molienda de harina, 8-55 a 8-56
Molienda de jabón, 8-67
Molienda de la mica, 8-59
Molienda de minerales, 8-56 a 8-62
Molienda del óxido de plomo, 8-54
Molienda de pigmentos y colores, 8-66
Molienda de polímeros orgánicos, 8-67 a 8-69
Molienda química, 8-66 a 8-67
Molienda de sílice, 8-59
Molienda de soya, 8-56
Molienda de sulfatos, 8-58 a 8-59
Molienda de talco, 8-58
Molienda del yeso, 8-63 a 8-65
Molino agitado, 8-39
Molino del Bureau of Mines, 8-39
Molino de granulación, 8-74
Molinos de anillos y rodillos, 8-67
Molinos de bolas, 8-39 a 8-41, 8-56, 8-60, 8-63 a 8-75, 8-66
- intermitentes, 8-15 a 8-16

Molinos de bolas planetarias, 8-41
Molinos de bolas no rotatorios, 8-39 a 8-41, 8-57
Molinos continuos, 8-15 a 8-16

- Molinos de chorro, 8-52 a 8-54, 8-67
- Molinos giratorios, 8-60
- Molinos de guijarros, 8-56
- Molinos de impacto, 8-57 a 8-62
- Molinos de jaula, 8-31
- Molinos de ladrillería, 8-56
- Molinos de martillo, 8-43 a 8-48, 8-55, 8-62
- Molinos de rodillo, 8-55, 8-57, 8-63 a 8-64
- Molinos de rodillos como procesos continuos, 19-116
- Molinos para sólidos con tambor doble, 11-50
- Molinos de vástago, 8-56
- Molinos vibratorios, 8-40, 8-55
- Molinos de volteo, 8-34 a 8-39
- Mollier, diagrama de:
  - para óxido nitroso, 3-255
  - para turbinas de vapor, 24-31
- Monte Carlo, método de incertidumbre, 25-26
- Mostinski, ecuación de, 10-23
- Motores de corriente, 24-8
  - control para los, 24-14
  - con devanado compuesto, 24-8
  - motores en serie, 24-8
- Motores de corriente alterna, 24-4 a 24-8
  - fórmulas, 24-4
  - de inducción con rotor devanado, 24-7 a 24-8, 24-14
    - control de, 24-7
  - síncronos, 24-6
  - velocidad constante, 24-4 a 24-6
    - frenado, 24-5 a 24-6
    - motores de inducción de jaula de ardilla, 24-5 a 24-6
  - velocidad múltiple, 24-6 a 24-7
    - motores con dos devanados, 24-6 a 24-7
    - motores de induccion con polos de amplitud modulada, 24-7
    - motores de jaula de ardilla con dos devanados, 24-7
    - motores de polos consecuentes con devanado sencillo, 24-7
- Motores eléctricos, 24-4 a 24-14
  - arrancadores:
    - de ca y velocidad múltiple, 24-14
    - de motores sincrónicos, 24-14
    - tipos de, 24-9 a 24-11
  - arranque de voltaje reducido, 24-13 a 24-14
  - control del motor, 24-9 a 24-14
  - cubiertas de los motores, 24-9
  - con mando de velocidad ajustable, 24-8 a 24-9
    - electromagnético, 24-8
    - mando RectiFlow, 24-9
    - mecánico, 24-8
  - motores de corriente alterna (*véase* Motores de corriente alterna)
  - motores de corriente continua, 24-8
    - control para los, 24-14
  - protección:
    - balance de la corriente de fase, 24-13
    - corto circuito, 24-11
    - diferencial, 24-13
    - fase inversa, 24-13
    - rotor trabado, 24-11 a 24-12
    - sobrecarga, 24-11
    - sobretensión, 24-13
    - subvoltaje, 24-13
    - a tierra para fallas, 24-13
- Movimiento browniano, 5-76, 21-38
  - tabla, 18-91
- Muescas, 5-21
- Muestreo:
  - para análisis de humedad, 21-12
  - para análisis químico, 21-12
  - control autoproporcional, 21-14
  - costo del, 21-10, 21-14
  - densidades de, 2-87 a 2-91
  - equipo para, 21-13
    - con control autoproporcional, 21-14
    - mecánico, 21-14
  - en húmedo, 21-4 a 21-14
  - isocinético, 20-90
  - de lechadas, 21-12
  - mecánico, 21-13
    - figura, 21-12
  - en seco, 21-11
  - sistemas de, 21-13
  - de sólidos, 21-11
  - tamaño, 21-10 a 21-13
    - para análisis de tamaño, 21-12
- Muestreo isocinético, 20-90
- Mullen, prueba de reventamiento de, 17-44
- Multiplicación, 2-14
- Murphree, eficiencia de vapor de, 13-36, 18-14, 18-16 a 18-17
- Mutación, ingeniería de, 27-5

- Naphtali-Sandholm, método de corrección simultánea de, 13-53 a 13-56
- Neón:
  - calor:
    - capacidad de, 3-159
    - latente, 3-145
  - compresibilidad del, 3-139
  - conductividad térmica, 3-298
  - constantes críticas, 3-135
  - densidad del, 3-98
  - presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-50
  - propiedades físicas del, 3-18
  - propiedades termodinámicas del, 3-252
  - relación de calor específico, 3-173
  - viscosidad del, 3-293
- Nefelometría, 22-53
- Nelsen y Eggertsen, sistema de crimatografía de gas de, 8-9
- Nieblas finas, recolección de, 18-91
- Níquel, cloruro de, datos de corrosión del, 23-30 a 23-32
- Níquel, sulfato de, datos de corrosión del, 23-30 a 23-32
- Níquel y sus aleaciones como materiales de construcción, 23-44
  - para alta temperatura, 23-72
  - propiedades de las, 23-51
- Nitrógeno, 12-51
  - calor:
    - capacidad de, 3-159
    - efecto de la presión y temperatura sobre la, 3-172
    - específico, 3-169
    - de formación, 3-187
    - latente, 3-145
  - compresibilidad del, 3-137

  - conductividad tér
  - constantes crítica
  - difusividad en, 3-
  - difusividades en
  - energía libre, 3-1
  - Joule-Thomson,
  - Prandtl, número
  - presión de vapor
    - arriba de 1 atn
    - hasta 1 atm, 3-
  - procesos de licue
  - propiedades físic
  - propiedades term
  - relación de calor
  - solubilidad en ag
  - viscosidad del, 3-
- Nitrógeno-argón-o
- Nitrógeno, dióxido
  - calor de formaci
  - energía libre, 3-1
  - presión de vapor
- Nitrógeno, óxidos
  - emisiones proce
  - propiedades físi
- Nitrógeno-oxígeno
- Nitroso, óxido, dia
- Nonano, propiedad
- NTU, Número de
- Nucleación, 18-92
  - de burbujas, 18-
  - en nieblas, 18-6
    - debida a núcl
- Nukiyama-Tanasa
- Neumática, 5-6
- Número de Arquím
- Número de unidad
- Números adimensi
- Números, complej
- Nusselt, ecuación
- Nusselt, número d
- NPV, Valor neto a
- Newton-Cotes, int
- Newton-Raphson,
- Newton, método d

- Occupational Safe
- O'Connell, correla
- Octano:
  - calor:
    - de combusti
    - específico, 3
    - de evaporaci
    - de formació
    - latente, 3-14
  - conductividad t
  - constantes críti
  - difusividades e
  - energía libre, 3-
  - presión de vapo
    - arriba de 1 a

conductividad térmica, 3-291
constantes críticas, 3-135
difusividad en, 3-304
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-187
Joule-Thomson, coeficiente, 3-131, 3-134
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
  arriba de 1 atm, 3-48
  hasta 1 atm, 3-50
procesos de licuefacción, tabla, 12-56
propiedades físicas de, 3-18
propiedades termodinámicas del, 3-253 a 3-254
relación de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-126
viscosidad del, 3-291, 3-293
Nitrógeno-argón-oxígeno, equilibrio líquido-vapor, 3-217
Nitrógeno, dióxido de:
  calor de formación, 3-187
  energía libre, 3-187
  presión de vapor del: hasta 1 atm, 3-50
Nitrógeno, óxidos de:
  emisiones procedentes de lechos fluidizados, 9-54
  propiedades físicas de los, 3-20
Nitrógeno-oxígeno, propiedades termodinámicas del, 3-259
Nitroso, óxido, diagrama de Mollier para el, 3-255
Nonano, propiedades termodinámicas del, 3-256
NTU, Número de unidades de transferencia en adsorción, 16-8
Nucleación, 18-92 a 18-93
  de burbujas, 18-68 a 18-69
  en nieblas, 18-61
    debida a núcleos extraños, 18-61 a 18-62
Nukiyama-Tanasawa, ecuación de, 20-102
Neumática, 5-6
Número de Arquímides, 9-54
Número de unidades de transferencia (NTU), 16-8
Números adimensionales en dinámica de fluidos, 5-70
Números, complejos, 2-42
Nusselt, ecuación de, 10-12
Nusselt, número de, 2-123
NPV, Valor neto actual, 25-6
Newton-Cotes, integración de, 2-70
Newton-Raphson, procedimiento de, 2-66
Newton, método de la raíz de, 2-10

Occupational Safety and Health Act (OSHA) reglamentos, 6-40
O'Connell, correlación de, 18-15
Octano:
  calor:
    de combustión, 3-195
    específico, 3-166 a 3-167
    de evaporación, 3-149, 3-150
    de formación, 3-180
    latente, 3-147
  conductividad térmica, 3-297
  constantes críticas, 3-135
  difusividades en pares de gases, 3-301
  energía libre, 3-180
  presión de vapor del:
    arriba de 1 atm, 3-83
    hasta 1 atm, 3-77
  propiedades físicas del, 3-48
  viscosidad del, 3-93
Oldershaw, columnas de, 18-15
Oldshue-Rushton, torre de, 21-85
Onda, ecuación de, 18-39
Operación en cascada, 8-35
Operación en catarata, 8-35
Operación con etapas múltiples a contracorriente en sistemas de sorción, 16-51 a 16-52
Operaciones de arranque y paro, control de las, 22-132 a 22-133
Operaciones con fracciones, 2-15
Operaciones de paro, control de las, 22-131 a 22-133
Operaciones unitarias, control de las:
  columna de destilación, 22-125 a 22-127
    calidad del producto, 22-126
    control básico, 22-125 a 22-126
    control de predicción, 22-127
    entrada de calor, 22-127
  intercambiadores de calor, 22-119 a 22-127
    control de alimentación directa, 22-120 a 22-123
    control del condensado, 22-120
    control de desviación, 22-120 a 22-121
    control de entalpía, 22-125 a 22-128
    control de la presión de vapor, 22-120
    control de vapor, 22-120
    válvulas de control, 22-120
  maximización del funcionamiento continuo, 22-135
  operaciones intermitentes, 22-132 a 22-135
    arranque de la columna de destilación, 22-132 a 22-134
    arranque de los procesos continuos, 22-133
    criterios de arranque y paro, 22-132 a 22-133
    reactor de polimerización, 22-133
  reactor intermitente (*véase* Reactor intermitente, control del)
  secadores (*véase* Secadores, control de los)
  velocidad de producción del reactor químico, 22-128 a 22-130
    balance de calor, 22-128 a 22-130
    sistema característico, 22-128
Optimización, 2-81 a 2-85
  métodos de cálculo de variaciones, 2-82
  programación, 2-82 a 2-84
  restricciones, 2-82
Optimización dinámica, 22-131
Orificio(s), 5-15 a 5-20, 5-41
  anular, 5-17
  excéntrico, 5-17
  medidores de flujo de, 5-15 a 5-19
    coeficiente de descarga, 5-16 a 5-19
    flujo crítico, 5-19
    pérdida de presión, 5-19
    velocidad de descarga, 5-14
  con orilla de cuadrante, 5-18
  con orillas cuadradas, 5-15
  precisión, 5-17 a 5-20
  de segmentos, 5-17
Ósmosis inversa (*véase* Procesos de membrana, ósmosis inversa)
Ostwald, coeficiente de, 14-7
Óxido nítrico, propiedades termodinámicas del, 3-253
Oxígeno, 12-51 a 12-52
  calor:
    capacidad de, 3-159

de formación, 3-187
latente, 3-145
específico, 3-169
compresibilidad del, 3-137
conductividad térmica, 3-291
constantes críticas, 3-136
densidad del, 3-98
difusividad en, 3-304
difusividades en pares de gases, 3-301
energía libre, 3-187
Prandtl, número de, 3-291
presión de vapor del:
arriba de 1 atm, 3-59
hasta 1 atm, 3-62
propiedades físicas del, 3-20
propiedades termodinámicas del, 3-257 a 3-259
razón de calor específico, 3-173
solubilidad en agua, 3-126
viscosidad del, 3-291 a 3-293
Oxígeno-argón-nitrógeno, equilibrio vapor líquido, 3-217 a 3-219
Oxígeno-propiedades termodinámicas del, 3-259
Oxígeno, transferencia de, 27-8 a 27-10

Pachuca, tanques, 19-55
Paletas, mezclado con, 19-6
Pall, anillos de, 18-22, 18-25, 18-29
costo de los, 18-48
Pappus, teorema de, 2-14
Paquetes, manejo y almacenamiento de, 7-54 a 7-60
Parábola, área de la sección, 2-13
Parábola, ecuaciones de la, 2-21
Paraboloide, elíptico, 2-28
Paraboloide, hiperbólico, 2-28
Paralelepípedo:
área de, 2-13
diagonal del, 2-13
volumen del, 2-13
Paralelogramo, área del, 2-12
Paramagnetismo en el análisis químico, 22-53
Parámetro del mecanismo:
difusión de la partícula con dispersión axial, 16-30
transporte externo con dispersión axial, 16-31
Parr, fórmula de, 9-4
Partícula(s):
en aerosol, 18-78
con agentes de acondicionamiento, 20-129
aglomeración de las, 21-4
atmosféricas, 20-90
baja resistividad, 20-129
características de las, figura, 20-89
características de flujo, 21-4
características de la superficie, 21-4
cargas electrostáticas de las, 21-5
clasificación en húmedo de, 21-23 a 21-25
clasificación de las, sobre mesas, 21-28 a 21-30
coeficiente de difusión de partícula, 20-88
coeficiente de resistencia, 5-70 a 5-75
concentración espiral de las, 21-30 a 21-32
crecimiento de las, 18-92 a 18-93
cribado, 21-26 a 21-27
densidad masiva de las, 21-4
densidad verdadera, 21-4
diámetro aerodinámico, 18-79, 18-86, 20-88
dinámica:
burbujas de gas, 5-73
efecto de la pared, 5-75
gotas líquidas, 5-74
región intermedia, 5-71
región de la ley de Newton, 5-72
rígidas no esféricas, 5-61 a 5-62
rígidas esféricas, 5-61 a 5-62
Stokes, ley de, 5-71
velocidad terminal, 5-71
equipo para recolección de, 18-80 a 18-91
depuradores venturi, 18-86, 18-89 a 18-90
depuradores en húmedo, 18-88
difusión, 18-92
dispositivos de inercia-impacto, 18-91
equipo de clasificación y recolección en relación al tamaño de las partículas, figura, 18-78
impacción, 18-92
Karbate, separadores de línea de, 18-83
lechos empacados, 18-84 a 18-85
precipitadores electrostáticos, 18-92
recolectores de nieblas mediante mallas de alambre, 18-86 a 18-87
sedimentadores por gravedad, 18-80
separadores centrífugos, 18-80
separadores de ciclón, 18-80
separadores por golpe, 18-80 a 18-82
separadores de platos ondulados, 18-82
esféricas, 20-64
factores de forma de las, 5-59
finas, 18-91
floculación selectiva de las, 21-57
forma de las, 21-4
nieblas, 18-77
mecanismos de recolección, 18-74
medición de las, 20-88 a 20-90
molibilidad, 21-4
movimiento browniano de las, 18-91
muestreo de gases, 18-77
no esféricas, factor de forma de las, 5-60
rocíos, 18-77
propiedades de las, 20-88
sedimentación obstaculizada, 5-76
separación:
por flotación, 21-51 a 21-55
de medio denso, 21-32 a 21-37
de medio pesado, 21-32 a 21-37
separación electrostática, 21-45 a 21-51
por ultraflotación, 21-57
separación magnética de las, 21-24 a 21-45
separación ultrafina, 21-57 a 21-59
tamaño de las, 20-66
análisis del, 18-78, 20-90
aplicación a las operaciones sólido-sólido, 21-3
contra clasificación de partícula, figura, 18-78
diámetro crítico, 20-97
distribución del, 21-4, 21-14
medición del, 20-90

producido p
a través de l
tamizado de las
trayectorias de
(*véase también*
Partícula, clasific
selectividad de
Partícula, distribu
ecuaciones, 8-
Gates-Gau
Gaudin-Me
Rosin-Ram
Partícula, medici
Kaye, fotosedi
método de ads
cromatogra
método centríf
método de dif
método de fot
método hidror
método de pip
método de sed
métodos de co
método de
Stokes, ley
métodos de el
métodos micr
Feret, diám
Fourier, m
Martin, diá
métodos de ta
felvación,
muestreo de p
procedimient
técnicas de pe
Partícula, reduc
agentes de dis
ayudas en la
característica
Hertz, teor
con clasificac
desgaste del
funciones de
funciones de
Gates-Gaudi
Gaudin-Melo
Hardgrove,
índice de abr
métodos de
molibilidad,
molienda en l
molinos cont
molinos inter
con otras ope
propiedades
seguridad, 8-
simulación d
Euler, mét
función d
método d
molienda

producido por diversos mecanismos, tabla, 18-78
a través de lechos empacados, 18-85
tamizado de las, 21-14 a 21-21
trayectorias de las, 5-76
(*véase también* Polvo, recolección de)
Partícula, clasificadores de tamaño de, 8-18
selectividad de tamaño, 8-18
Partícula, distribución del tamaño de, 8-17
ecuaciones, 8-5
Gates-Gaudin-Schummann, 8-5
Gaudin-Meloy, distribución de, 8-5
Rosin-Rammler-Bennett, 8-5
Partícula, medición del tamaño de, 8-6 a 8-9
Kaye, fotosedimentomedidor de, 8-8
método de adsorción de gas, 8-9
cromatografía de gas de Nelsen y Eggertsen, 8-9
método centrífugo, 8-8
método de difracción de la luz, 8-8
método de fotosedimentación, 8-8
método hidrométrico, 8-7
método de pipeta, 8-7
método de sedimentación, 8-7
métodos de corriente, 8-8
método de la balanza, 8-8
Stokes, ley de, 8-7
métodos de elutriación, 8-9
métodos microscópicos, 8-6
Feret, diámetro de, 8-7
Fourier, método de, 8-7
Martin, diámetro de, 8-7
métodos de tamizado, 8-8
felvación, 8-9
muestreo de polvos, 8-6
procedimientos en la línea, 8-9
técnicas de permeabilidad, 8-9
Partícula, reducción del tamaño de, 8-10 a 8-22
agentes de dispersión, 8-15
ayudas en la molienda, 8-15
características de una sola partícula, 8-10
Hertz, teoría de, 8-10
con clasificación de tamaño, 8-17
desgaste del molino, 8-11
funciones de molienda, comportamiento de las, 8-21
funciones de velocidad de molienda, 8-21
Gates-Gaudin-Schummann, distribución de, 8-17
Gaudin-Meloy, distribución de, 8-17
Hardgrove, método de, 8-11
índice de abrasión, tabla, 8-12
métodos de molibilidad, 8-11
molibilidad, 8-11
molienda en húmedo comparada con molienda en seco, 8-15
molinos continuos, 8-15 a 8-16
molinos intermitentes de bolas, 8-16
con otras operaciones, 8-16 a 8-17
propiedades de los sólidos, 8-10 a 8-13
seguridad, 8-12
simulación de la molienda, 8-18 a 8-22
Euler, método de, 8-19
función de ruptura, 8-19
método de la matriz, 8-19
molienda en circuito cerrado, 8-20
molienda intermitente, 8-19
resolución analítica de Reid, 8-19
resolución de las ecuaciones de un molino intermitente, 8-19
resolución de un molino continuo, 8-19
simulación de un molino continuo, 8-19
Snow y Meloy, función de molibilidad de, 8-22
tamaño obtenible y energía requerida, 8-13 a 8-16
eficiencia de molienda, 8-13 a 8-14
leyes de energía, 8-13
trituradores (*véase* Molienda, equipo de)
Pascal, ley de, 5-6
Pastas, mezcladores de [*véase* Mezclador(es) para pastas]
Pastillaje, 11-49
Pastillaje, aditivos utilizados en, tabla, 8-72
Pastillaje, prensas de, 8-72 a 8-73
Peclet, número de, 16-23
para dispersiones axiales, 16-28
Películas como factor en la corrosión, 23-6 a 23-7
Pendientes de media altura, uso de las, en las determinaciones del número de unidades de reacción, 16-32 a 16-33
Pentano, propiedades termodinámicas del, 3-259
Pérdida por entrada, 5-38 a 5-41
Pérdidas por ensanchamiento, 5-41
Pérdidas de salida, 5-41
Pérdidas por salpicaduras, 11-40
Perímetro del polígono regular inscrito, 2-12
Periodo equivalente de inversión máxima (EMIP) (Equivalent maximum investment period), 25-12
Periodo de reembolso, 25-10
efecto de la inflación sobre el, 25-36 a 25-37
Permaselectividad de las membranas, 17-44
Permeabilidad, coeficiente de, 5-63
Permeabilidad magnética, 21-3
Permeabilidad en la separación magnética, 21-37
Permutaciones, 2-15 a 2-16
Pesado de sólidos a granel:
pesado intermitente, 7-35
continuo, 7-36
Petlyuk, torres de, 13-8
Petróleo, 9-12, 13-76 a 13-87
análisis final, tabla, 9-13
calor de combustión, 9-14
gráfica, 9-13
capacidad de calor específico, 9-15
caracterización del, 13-76
clasificaciones del, 9-16 a 9-17
conductividad térmica, 9-15
gráfica, 9-15
consideraciones de seguridad, 9-16 a 9-17
contenido de hidrógeno, 9-14
curvas de destilación, gráfica, 13-78 a 13-79
destilación, aplicaciones de la, 13-80
especificaciones del, 9-14
expansión térmica, 9-15
gravedad, 9-13
gravedad específica, 9-13
petróleo crudo, curvas de destilación, gráfica, 13-79
propiedades del:
físicas, 9-13
químicas, 9-13
punto de fluidez, 9-13

relaciones viscosidad-temperatura, 9-14
gráfica, 9-14
Petróleo crudo, curvas de destilación, gráfica, 13-79
pH, medición del, 22-53 a 22-54
electrodos de iones específicos, 22-54
Picard, método de, de la aproximación sucesiva, 2-52
Piezómetro de anillo, 5-9
Piletas para almacenamiento de líquidos, 6-115
Piletas de enfriamiento, 12-23 a 12-25
Pirámide:
área de la, 2-13
trucamiento de la, 2-13
volumen de la, 2-13
Pirómetros, 22-38
Pitómetro, 5-10
Pitzer, ecuación de, 4-76 a 4-80
Placas desviadoras:
caída de presión, 5-44
contra choque, 11-19
cortes, 11-18
de charolas, 11-44
espaciadores para, 11-18, 11-19
de espiral, 11-34
longitudinales, 11-19
de segmento, 11-13
de varilla, 11-18
varillas de tensión para, 11-7, 11-18
Placas desviadoras de choque, 21-71
Placas desviadoras en zigzag, 18-82
Placas perforadas, superficies de las cribas, 21-19
Planck, ley de, 10-56
Planck, ley de, constantes de la, 10-56
Plásticos:
acetatos, 23-55
acrilonitrilo butadieno estireno, 23-55
butirato de acetato de celulosa, 23-55
clorotrifluoroetileno (Kel-F, Plaskon), 23-53, 23-55
cloruro de polivinilo, 6-76
fluoruro de polivinilideno (Kynar), 6-75, 23-55
Kynar (fluoruro de polivinilideno), 6-75, 23-55
como materiales de construcción, 23-53, 23-55
óxido de polifenileno, 23-55
poliamida, 23-55
polietileno, 6-75
polipropileno, 6-75, 23-55
polisulfona, 23-55
propiedades físicas y mecánicas de los, 23-56
resistencia química de los, 23-56
Saran (cloruro de polivinileideno), 6-75
sulfuro de polifenileno, 23-55
termoestables, 23-55
tetrafluoroetileno (Teflón), 23-52
Plata:
calor:
capacidad de, 3-160
específico, 3-162
de formación, 3-189
latente, 3-145
conductividad térmica, 3-306 a 3-307
densidad de la, 3-119
energía libre, 3-189
expansión térmica, 3-128
presión de vapor de la, hasta 1 atm, 3-51
propiedades de la, 23-54
físicas, 3-22
Platos perforados y distribuidores de pantalla, 5-42
Podbielniak, extractor, 21-89 a 21-90
Poiseuille, ley de, 5-32
Poisson, ecuación de, 2-8, 2-49
Polarográfico, análisis, 22-54
Poliedros:
área de los, 2-13
volumen de los, 2-13
Poliestireno como adsorbente, 16-9 a 16-10
Polígono regular, área de, 2-11
Polimerización, control de la, 22-111 a 22-112
Polinomios, 2-42
Polvo, definición de, 20-88
Polvo, recolección de, 20-88, 21-9
eficiencia de la, 20-91
equipo para, 20-93 a 20-136
cámaras de asentamiento por gravedad, 20-93
depuradores, 20-104 a 20-109
diseño del, 20-92
filtros de bolsas, 20-110 a 20-117
filtros de tela, 20-110 a 20-117
separadores de ciclón (*véase* Separadores de ciclón)
separadores por choque, 20-93
factor de descontaminación, 20-92
índice de descontaminación, 20-92
mecanismos para la, 20-90
en el mezclado de sólidos sólidos, 21-9
objetivo de la, 20-88
(*véase también* Separaciones de gas-sólido)
Polvo, separación de, 20-77 a 20-78
Porcelana, propiedades de, 23-49
Porosidad de sorbentes, 16-10
interna, 16-10
Posicionadores neumáticos, 22-94 a 22-96
aplicaciones de, guías para, 22-96
características dinámicas de, 22-96
principios de operación de, 22-95
(*véase también* Actuadores de posición lineal)
Potasio, cloruro de, 20-41
Potasio, hidróxido de, datos de corrosión, 23-30 a 23-32
Potasio, permanganato de, datos de corrosión, 23-33 a 23-35
Potasio, propiedades termodinámicas del, 3-260 a 3-261
Potasio, sulfato de, datos de corrosión, 23-33 a 23-35
Potencia de contacto, 20-102 a 20-103
Potencia (en probabilidad), 2-94 a 2-95
Potenciométrico, análisis, 22-54
Pozo profundo, inyección de desperdicios, 26-76 a 26-78
Prandtl, número de, 2-123
para aire, 3-299
para gases, 3-291
para refrigerantes, 3-300
Precalentadores, 9-68
Precipitadores (*véase* Precipitadores eléctricos)
Precipitadores eléctricos, 20-124 a 20-136
agentes de acondicionamiento, 20-129
de alta presión y alta temperatura, 20-127
aplicación de los, 20-127
carga de la partí
de corriente alte
de dos etapas, 2
eficiencia de co
electrodos de lo
de etapa sencill
flujo de corrient
golpeo de los, 2
intensidad del c
ionización, 20-1
movilidad de la
resistividad baj
potencial, 20-1
problemas de re
suministro de p
transferencia d
viento eléctrico
Precipitador elect
Precipitadores tér
Precondensadores
Prelavadores de c
Prensaestopas, 6-
Prensas:
continuas, 19-1
de banda, 1
molinos de
intermitentes, 1
de caja, 19-
de guarnicio
de placas, 1
de olla, 19-1
de tornillo, 19-
costo de las,
Prensas de rodillo
Presión:
absoluta, 5-6
barométrica, 5-
carga de, 5-6
crítica, 3-135 a
predicción
para relació
dinámica, 5-6
estática, 5-6, 5-
impacto, 5-6
medición de la
medidores de (
pérdida de (*véa*
total, 5-6
de vapor, (*véas*
Presión absoluta,
medición de la,
Presión estática,
Presión de vapor,
del agua, 3-57
de compuestos
arriba de 1
hasta 1 atm,
de compuestos
arriba de 1
hasta 1 atm,
del hielo, 3-57

carga de la partícula, 20-125
de corriente alterna, 20-136
de dos etapas, 20-135 a 20-136
eficiencia de colección de los, 20-126 a 20-127
electrodos de los, 20-132
de etapa sencilla, 20-129 a 20-130
flujo de corriente, 20-125
golpeo de los, 20-131
intensidad del campo, 20-124
ionización, 20-125
movilidad de la partícula, 20-126
resistividad baja de la partícula, 20-129
potencial, 20-129 a 20-125
problemas de resistividad, 20-128
suministro de potencia, 20-133 a 20-134
transferencia de momento, 20-125 a 20-126
viento eléctrico, 20-125 a 20-126
Precipitador electrostático, 20-90
Precipitadores térmicos, 20-90
Precondensadores, 6-32
Prelavadores de ciclón, 20-113
Prensaestopas, 6-34
Prensas:
continuas, 19-115 a 19-117
de banda, 19-116 a 19-117
molinos de rodillos, 19-116
intermitentes, 19-115
de caja, 19-115
de guarnición, 19-115
de placas, 19-115
de olla, 19-115
de tornillo, 19-106
costo de las, 19-106
Prensas de rodillos, 8-67
Presión:
absoluta, 5-6
barométrica, 5-7
carga de, 5-6
crítica, 3-135 a 3-136
predicción de la, 3-300
para relación de gases, 5-14
dinámica, 5-6
estática, 5-6, 5-9
impacto, 5-6
medición de la (*véase* Medición de la presión)
medidores de (*véase* Medidor(es) de presión)
pérdida de (*véase* Caída de presión)
total, 5-6
de vapor, (*véase* Presión de vapor)
Presión absoluta, 5-6
medición de la, 5-6 a 5-8
Presión estática, 5-6 a 5-9
Presión de vapor, 3-57 a 3-83
del agua, 3-57
de compuestos inorgánicos:
arriba de 1 atm, 3-57
hasta 1 atm, 3-59 a 3-61
de compuestos orgánicos:
arriba de 1 atm, 3-82 a 3-83
hasta 1 atm, 3-65 a 3-82
del hielo, 3-57
de soluciones, 3-83 a 3-92
de sustancias puras, 3-57 a 3-83
Presupuestos:
estático, 25-61 a 25-62
flexible, 25-61 a 25-62
Prigogine, ecuación de, 13-69
Prisma:
área del, 2-13
volumen del, 2-13
Probabilidad, 25-33 a 25-34
principio de, para el cribado, 21-19 a 21-20
Problema braquistocrono, 2-78 a 2-79
Problemas de marcha, 2-8
Problemas del valor límite, 2-8
Procesamiento de los alimentos, 21-48
Procesamiento de desperdicios peligrosos, 26-65 a 26-66
técnicas para desperdicios de sólidos, 26-58 a 26-64
(*véase también* Desperdicios de sólidos)
Procesamiento en medio denso (*véase* Separación de medios densos)
Procesamiento por sedimentación y flotación (*véase* Separación de medios densos)
Procesos de membrana, 17-16 a 17-17
diálisis, 17-21 a 17-23
aplicaciones de la, 17-24
comercial, 17-24
continua, 17-24
definición de la, 17-21
diseño del equipo para, 17-23 a 17-24
ecuación del coeficiente de la, 17-22
intermitente, 17-24
mecanismo de la, 17-21
membranas, 17-24
ósmosis inversa, 17-25
aplicaciones de la, 17-29 a 17-30
definición de la, 17-25
estimaciones de costos para, 17-31
membranas, 17-27 a 17-29
transferencia de masa en, 17-23 a 17-25
permeación de la membrana, 17-15 a 17-19
aplicaciones de la, 17-21
concentración y presión, efecto de la, 17-17 a 17-18
definición de la, 17-16
diseño de la unidad de separación, 17-21
factor de separación, 17-20
temperatura, efecto de la, 17-18
teoría de la, 17-17
transferencia de masa en la, 17-15 a 17-16
ventajas de la, 17-19
ultrafiltración, 17-30 a 17-31
aplicaciones de la, 17-36 a 17-37
costo estimado de la, 17-37
definición de la, 17-32
membranas, 17-34
transferencia de masa, 17-30 a 17-32
Programación para optimización, 2-82 a 2-84
Progresión, armónica, 2-15, 2-41
Progresiones, 2-10 a 2-11, 2-15
aritméticas, 2-39
armónicas, 2-40
geométricas, 2-39

Progresiones aritméticas, 2-10, 2-15, 2-39
Progresiones aritmético-geométricas, 2-11
Progresiones geométricas, 2-10, 2-15, 2-41
Promedio aritmético, 2-15
Propano:
  calor:
    de combustión, 3-195
    específico, 3-166
    de evaporación, 3-149, 3-151 a 3-152
    de formación, 3-180
    latente, 3-147
  conductividad térmica, 3-291
  constantes críticas, 3-136
  energía libre, 3-180
  Joule-Thomson, coeficiente de, 3-134
  Prandtl, número de, 3-291
  presión de vapor del:
    arriba de 1 atm, 3-83
    hasta 1 atm, 3-78
  propiedades físicas del, 3-50
  propiedades termodinámicas del, 3-153
  viscosidad del, 3-291, 3-293
Propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción:
  aceros, 23-17
    aleaciones inoxidables coladas, 23-43
    aceros inoxidables, 23-42, 23-45
    inoxidables austeníticos, 23-43
    inoxidables ferríticos, 23-43
  aceros de baja aleación, 23-17, 23-44 a 23-45
  aleaciones:
    de aluminio, 23-44, 23-50
    de cobalto, 23-54
    de cobre, 23-52
    de hierro colado, 23-47
    de magnesio, 23-54
    metales preciosos y, 23-54
    de níquel, 23-47
    de plomo, 23-54
    refractarias, 23-54
    de titanio, 23-54
  cacharros, 23-67
  carbón, 23-47
  cemento, 23-50
  concreto, 23-50
  empaques, 23-67
  hierro colado, 23-17
    aleación de, 23-17
    blanco, 23-17
    dúctil, 23-17
    gris, 23-17
    maleable, 23-17
  hierros con alto contenido de sílice, 23-42
  ladrillo, 23-50
  ladrillo refractario, 23-69
  metales refractarios, 23-68
  plásticos, 23-56 a 23-58
  porcelana, 23-67
  (*véase también* el material específico)
  vidrio, 23-56
Propiedades físicas, predicción y correlación de las, 3-309
  coeficientes de difusión, 3-333 a 3-335
  constantes del componente puro, 3-310 a 3-312
  densidad del líquido, 3-318 a 3-321
  densidad de vapor, 3-312 a 3-318
  nomenclatura, 3-309 a 3-310
  presión de vapor, 3-320
  viscosidad, 3-325 a 3-333
Propiedades matemáticas, 2-9
Propiedades termodinámicas, 3-204 a 3-290
  específicas, 4-60
  evaluación de las, 4-73 a 4-76
  extensivas, 4-60
  intensivas, 4-60
  molares, 4-60
  (*véase también* el fluido específico)
Propiedades termodinámicas, relaciones de las:
  para capacidades de calor, 4-61 a 4-62
  fundamentales para sistemas PVT, 4-60
  para gases ideales, 4-62
  para propiedades molares parciales, 4-62 a 4-63
  resumen de las, tabla, 4-65
  para sistemas de composición constante, 4-61 a 4-62
  para sistemas de composición variable, 4-62 a 4-64
Propiedades termofísicas, tabla, 3-308
Propiedades de transporte, tablas, 3-291 a 3-308
  conductividades térmicas, 3-297 a 3-299
  difusividades, 3-301 a 3-304
  viscosidades, 3-293 a 3-296
Propilenglicol, 12-45
Propileno:
  calor de combustión, 3-196
  conductividad térmica, 3-291
  Prandtl, número de, 3-291
  presión de vapor del, arriba de 1 atm, 3-83
  propiedades físicas del, 3-51
  propiedades termodinámicas del, 3-262 a 3-263
  viscosidad del, 3-291
Proporciones matemáticas, 2-9
Propulsores de cadena, 24-48
Protección anódica, 23-8
Protección catódica, 23-8
  fem aplicada, 23-8
  método del ánodo de sacrificio, 23-8
Prueba de la bondad del ajuste, 2-98 a 2-101
Prueba de destilación para el punto verdadero de ebullición, 13-78
Prueba de la razón, 2-39
Pruebas:
  corriente de eddy, 6-125
  de corrosión, 23-9 a 23-15
  de cribas, 21-20 a 21-21
    International Standards Organization, serie de cribas de la, 21-20 a 21-21
    series de cribas U.S., 21-31
    Tyler, criba estándar de, 21-31
  hidrostáticas, 6-125
  método de polarización lineal, 23-14 a 23-15
  radiográficas, 6-125
  de resistencia eléctrica, 6-125
    método de, 23-14
  de partícula magnética, 6-125
  de penetración de líquido, 6-125
  de tubería, 6-106 a 6-111
  ultrasónicas, 6-12
Pruebas de desinteg
Pruebas de dureza a
Psicrometría, 12-3 a
  calor húmedo, 12
  humedad absolut
    porcentaje de,
  humedad relativa
  humedad de satu
  temperatura del p
  temperatura de bu
  temperatura de s
  volumen húmedo
  volumen saturad
Puenteo de partícul
Pulsación, amortigu
Pulsación, dispositi
Pulso, prueba de, 2
Pulverizadores:
  capacidad de los,
  de carbón, 9-49
  combustible pul
  combustión de c
  índice de molibil
    gráfica, 9-81
    de Hardgrove
  salida de los, 9-8
Punto de ebullición
Punto de carga, 18-
Punto discontinuo
Punto de fusión:
  de aceros de baja
  de aleaciones co
Punto de pliegue, 1
Punto de saturación
Purgas, 18-4
Purificador Brodie

Quebradoras de im
Quelación en las re
Quemador de lech
Quemadores Batte
Queroseno, curva

Radiación gamma
Rachford-Rice, ec
Radiación solar en
Radiación, transfe
  en cámaras de c
  coeficientes de,
  definición de la,
  efectos de los pr
    emisividad d
    longitud me
  entre gases y un
  llamas, 10-65
  nubes de partícu
    negras, 10-6
    no negras, 1

  ultrasónicas, 6-125
Pruebas de desintegración de la tableta, 8-65
Pruebas de dureza a baja temperatura, 6-105
Psicrometría, 12-3 a 12-13
  calor húmedo, 12-3
  humedad absoluta, 12-3
    porcentaje de, 12-3
  humedad relativa, porcentaje de, 12-3
  humedad de saturación, 12-3
  temperatura del punto de rocío, 12-3
  temperatura de bulbo húmedo, 12-3
  temperatura de saturación adiabática, 12-3
  volumen húmedo, 12-3
  volumen saturado, 12-3
Puenteo de partículas, 17-61
Pulsación, amortiguación de, 5-69
Pulsación, dispositivos de, 21-87 a 21-88
Pulso, prueba de, 22-139 a 22-140
Pulverizadores:
  capacidad de los, 9-49
  de carbón, 9-49
  combustible pulverizado en generadores de vapor, 9-79
  combustión de combustible pulverizado, 9-46 a 9-49
  índice de molibilidad:
    gráfica, 9-81
    de Hardgrove (HGI), 8-11, 9-7
  salida de los, 9-83
Punto de ebullición, medición del, 22-59
Punto de carga, 18-26
Punto discontinuo de equilibrio (DBEP), 25-13
Punto de fusión:
  de aceros de baja aleación, 23-47
  de aleaciones comunes, 23-43
Punto de pliegue, 15-6
Punto de saturación de fibra, 20-5
Purgas, 18-4
Purificador Brodie, 17-12

Quebradoras de impacto, 8-30
Quelación en las resinas de intercambio iónico, 16-6
Quemador de lecho fluidificado, 20-82
Quemadores Battelle de lecho fluidificado, 20-82
Queroseno, curva de destilación, gráfica, 13-78

Radiación gamma en la medición de densidades, 22-50
Rachford-Rice, ecuación de, 13-27
Radiación solar en diferentes latitudes, tabla, 12-25
Radiación, transferencia de calor por, 10-55 a 10-72
  en cámaras de combustión, 10-69 a 10-70
  coeficientes de, 10-11
  definición de la, 19-8
  efectos de los productos de combustión, 10-63
    emisividad de gases, 10-63
    longitud media del rayo, 10-62
  entre gases y un sólido, 10-68 a 10-69
  llamas, 10-65
  nubes de partículas, 10-66
    negras, 10-66
    no negras, 10-67
  entre partículas y un sólido, 10-68 a 10-69
  poder de emisión, definición del, 10-55
  radiación del cuerpo negro, 10-56
  entre superficies de sólidos, 10-57
    absortividad, 10-57
    efecto de la temperatura de la fuente de radiación, 10-57
    espacios cerrados de superficies negras, 10-59
    espacios cerrados de superficies no negras, 10-61 a 10-62
    Kirchhoff, ley de, 10-57
    de materiales refractarios, 10-58
    de metales pulidos, 10-57
Radio de un círculo inscrito en un triángulo, 2-12
  hidráulico, 5-6, 5-28
Radio hidráulico, 5-6, 5-28
  medio, 5-6
Ranque-Hilsch, tubo de, 22-58
Raoult, ley de, 13-23
Rastreadores, 11-33
Rayleigh-Weber, mecanismo de ruptura de, 18-50
Rayleigh, método de, de análisis dimensional, 2-120 a 2-121
Razón sicrométrica, 12-3, 20-21
Reacción(es) química(s):
  absorción de gas por (*véase* Absorción de gas por reacción química)
  autocatalíticas, 4-36
  en cadena, 4-6
  con catalizador, 4-13
    (*véase también* Catálisis)
  cinética de, 4-4 a 4-27
  complejas, 4-4 a 4-5
  consecutivas, 4-36
    en serie, 4-5
  datos de velocidad química de, 4-47
  ecuaciones de velocidad (*véase* Ecuaciones de velocidad)
  equilibrio:
    en celdas electroquímicas, 4-96
    constante global de, 4-15
    constantes de, 4-15, 4-89 a 4-91
    para gases ideales, 4-90
    tablas, 4-48 a 4-51
  en estado sólido, 4-12
  extensión de la reacción, 4-90
  fluido-sólido, 4-8 a 4-10
    en condiciones isotérmicas, 4-10
    en condiciones no isotérmicas, 4-10
    con geometría no esférica, 4-10
    modelo de núcleo no reactivo, 4-9
    reactores para, 4-39
  gas-líquido, 4-11 a 4-12
  heterogéneas no catalíticas, 4-7 a 4-13
    industriales, tabla, 4-8
    mecanismo de, 4-7
    reactores para, 4-39
  intermedias, 4-19
  líquido líquido, 4-11
  mecanismo de, verificación, 4-20
  mixtas, 4-6
  molecularidad de, 4-3
  orden de, 4-3
  paralelas, 4-36 a 4-37
    simultáneas, 4-5

de polimerización, 4-36
reacciones catalizadas por sólidos, mecanismos de, tabla, 4-16
reactores para, 4-41
reversible, 4-4
termodinámica de (*véase* Termodinámica)
velocidad de, 4-16
constante de velocidad, 4-22
efectos de la presión sobre, 4-34
específica, 4-22
etapas que controlan la velocidad, 4-22 a 4-23
reacciones complejas, tabla, 4-7
reacciones simples, tabla, 4-6
Reactor intermitente, control del, 22-134 a 22-137
adición del reactivo, 22-134 a 22-137
control por computadora, 22-134
control predecible, 22-135
optimización del control, 22-135
programación, 22-134
programador, punto final, 22-134
reactivo, adición del, 22-134 a 22-135
Reactores:
catalíticos:
catalizados con sólidos (*véase* Reactores catalíticos catalizados por sólidos)
de lechos fluidificados, 20-79 a 20-81
de encendido, 9-69 a 9-72
de lechos fluidificados no catalíticos, 20-82
de lechos fluidificados heterogéneos, 20-82
de lechos fluidificados homogéneos, 20-82
químicos (*véase* Reactores químicos)
Reactores, 4-27 a 4-28
balances de materia y energía de, 4-30 a 4-31
capacidad de, 4-29
catalíticos (*véase* Reactores catalíticos)
continuos, 4-27
curvas de respuesta del trazador para los, 4-35
diseño de, 4-27 a 4-54
con flujo no ideal, 4-34
distribución del tiempo de residencia en, 4-35
ecuaciones de diseño de, 4-28 a 4-31
para sistemas de reactores múltiples, 4-31
efectos de la presión sobre, 4-34
efectos térmicos en, 4-33
espacio tiempo, 4-29 a 4-30
espacio velocidad, 4-30
experimentales, 4-17 a 4-19
factores económicos de, 4-38
factores de selección:
proceso físico, 4-37
proceso químico, 4-36
sociales, 4-38
de fase de lechada, 4-28
heterogéneos no catalíticos, 4-39
ideales, 4-28 a 4-29
intermitentes, 4-27
de lecho fluidificado, 4-28, 4-39 a 4-40
a pistón, 4-31 a 4-34
para reacciones catalizadas por sólidos (*véase* Reactores catalíticos catalizados por sólidos)
de retromezclado, 4-29, 4-32, 4-34, 4-38
semicontinuos, 4-27
similitud química en, 4-23 a 4-24
de tanque, 4-27
tipos de:
clasificación de, 4-27 a 4-28
efectos de los, 4-32 a 4-33
de torre, 4-27
transferencia de calor en, 4-52 a 4-54
tubulares, 4-27
velocidad de producción, control de, 22-121 a 22-123
Reactores biológicos, 27-5 a 27-14
esterilización, 27-12 a 27-14
fermentadores, 27-5 a 27-8
sistemas de rociadores, 27-11 a 27-12
transferencia de oxígeno, 27-8 a 27-11
Reactores catalíticos catalizados por sólidos, 4-41
difusión en, 4-42
factores de la dinámica de fluidos, 4-41
número de transmisión de calor, 4-43
transferencia de masa en, 4-42 a 4-46
Reactores continuos de tanque agitado (CSTR) (*véase* Reactores de retromezclado)
Reactores saturables, 24-8
Rearrastre, 18-75 a 18-76
Rebote de partículas, 20-121
Recalentadores, 9-78
Recipientes, 6-120
para gases, 6-115 a 6-116
portátiles, 6-120
Recipientes agitados, 21-65 a 21-70
con agitación de gas, 21-70
con agitación mecánica, 21-65
área interfacial, 18-74
celdas de flotación en, 19-14
coeficiente(s):
en fase continua, 21-68
total, 21-68
para dispersión gas-líquido:
área interfacial, 18-74
diámetro de la burbuja, 18-74
retención del gas, 18-74 a 18-75
transferencia de masa, 18-76
eficiencia de etapa de, 21-68
escalamiento de, 21-69
con fase dispersa, 21-65
mezclado, uniformidad del, 21-65 a 21-66
con y sin placas desviadoras, 21-66 a 21-67
potencia para, 21-67
recirculación entre etapas, 21-69
transferencia de masa en, 18-73 a 18-75
coeficiente en fase líquida, 18-76
velocidades de, 21-68
velocidades de reacción química en, 21-69 a 21-70
Recipientes agitados para sólidos, 11-50
Recipientes encamisados, 11-32 a 11-33
Recipientes a presión, 6-120 a 6-129
aceros de alta resistencia para, 6-126
para alta temperatura, 6-126
de cerámica, 6-127
código ASME, 6-120 a 6-125
construcción de, 6-127 a 6-128
construcción de capas múltiples para, 6-126
costo de, 6-128
cuidado de, 6-12
diseño de, 6-128
seguridad en e
fatiga del metal e
fractura por fragi
de grafito, 6-127
materiales de co
métodos de fabri
peso de, 6-126
de piezas forjada
de plástico, 6-12
de plástico refor
prueba de, 6-125
recubiertos, 6-12
seguridad en el d
Recipientes para re
Recirculación entre
Recirculación y re
Recolectores de le
Recorte de un proc
Rectángulo, área d
Rectificación, defi
Recubrimientos, p
para concreto, 2
Recuperación de p
arranque, 24-49
características d
comportamiento
comportamiento
consideraciones
controles del pr
costo de la, 24-4
fluidos de vapor
generación eléc
principios de la,
sobrecapacidad
unidades integr
velocidad de, 2
volúmenes de fl
Redlich-Kwong, e
Reducción de tam
mediante agitad
de partículas (v
Refinado, 15-3
Reflujo mínimo, 1
Reflujo, relación d
externa, 13-30
interna, 13-30
Refrigeración, 12-
calor de compre
carga de calor d
efecto neto de r
equipo para, 12
equipo de comp
compresores
compresores
compresores
chorros de v
estimación de c
salmueras, 12-

  - costo de, 6-128
  - cuidado de, 6-128
  - diseño de, 6-128
    - seguridad en el, 6-124
  - fatiga del metal en, 6-124
  - fractura por fragilización, 6-125
  - de grafito, 6-127
  - materiales de construcción para los, 6-124
  - métodos de fabricación, 6-121
  - peso de, 6-126
  - de piezas forjadas sólidas, 6-126
  - de plástico, 6-127
  - de plástico reforzado con fibra de vidrio, 6-124
  - prueba de, 6-125
  - recubiertos, 6-127
  - seguridad en el diseño de, 6-124
- Recipientes para reacciones nucleares, 6-126 a 6-128
- Recirculación entre etapas, 21-69
- Recirculación y reutilización del agua, 26-51 a 26-52
- Recolectores de lecho empacado, 18-85 a 18-86
- Recorte de un proceso existente, 25-17
- Rectángulo, área del, 2-11
- Rectificación, definición de la, 18-3
- Recubrimientos, propiedades de los, 23-62
  - para concreto, 23-62
- Recuperación de potencia de corrientes de líquidos, 24-41 a 24-50
  - arranque, 24-49
  - características de instalación, 24-48 a 24-50
  - comportamiento hidráulico, 24-41 a 24-42
  - comportamiento de operación, 24-42 a 24-43
  - consideraciones de diseño, 24-43 a 24-48
  - controles del proceso, 24-49
  - costo de la, 24-42
  - fluidos de vaporización, 24-48 a 24-49
  - generación eléctrica, 24-55
  - principios de la, 24-42 a 24-43
  - sobrecapacidad, 24-49
  - unidades integrales, 24-50
  - velocidad de, 24-49
  - volúmenes de fluido, 24-49
- Redlich-Kwong, ecuación de, 4-76 a 4-84
- Reducción de tamaño:
  - mediante agitadores, 19-14
  - de partículas (*véase* Partícula, reducción del tamaño de)
- Refinado, 15-3
- Reflujo mínimo, 13-35 a 13-36
- Reflujo, relación de:
  - externa, 13-30
  - interna, 13-30
- Refrigeración, 12-25 a 12-48
  - calor de compresión, 12-31
  - carga de calor del condensador, 12-31
  - efecto neto de refrigeración, 12-31
  - equipo para, 12-30
  - equipo de compresión de vapor, 12-33 a 12-41
    - compresores centrífugos, 12-33 a 12-35
    - compresores de movimiento alternativo, 12-35 a 12-38
    - compresores rotatorios de tornillo, 12-38 a 12-39
    - chorros de vapor, 12-39 a 12-41
  - estimación de costos de los sistemas de refrigeración, 25-82
  - salmueras, 12-44 a 12-50
    - (*véase también* Salmueras)
  - sistemas de absorción, 12-41 a 12-45
    - cálculo de los, 12-42 a 12-44
    - ciclo de los, 12-41
    - control de capacidad, 12-42
    - diagrama de equilibrio, 12-41
    - eficiencia de la unidad, 12-42
  - sistemas de compresión de vapor, 12-30 a 12-33
    - cálculo de los, 12-31
    - ciclos de etapas múltiples, 12-31 a 12-33
    - diagrama *P-h*, 12-30 a 12-31
    - de una sola etapa, 12-30
  - a temperaturas criogénicas, 12-53 a 12-57
  - tonelada de, definición de la, 12-27
- Refrigerante R-11, 12-49
  - propiedades termodinámicas del, 3-264
- Refrigerantes:
  - composición química de los, 12-27
  - funcionamiento teórico de los, tabla, 12-29
  - propiedades de los, 12-27
    - termodinámicas, 3-264 a 3-275
- Regeneración, 16-18
  - eficiencia de la, 16-38
  - de flujo inverso, 16-39
  - potencial, 16-38
  - retroflujo, 16-38 a 16-39
- Regeneración de calor, 9-100 a 9-103
  - de estufa de guijarros, 9-102
  - estufas de altos hornos, 9-101
  - hornos de coque, 9-102
  - Ljungstrom, calentadores de aire, 9-102
  - regeneradores de hogar abierto, 9-101
  - regeneradores de ladrillos jaquelados, 9-100
    - defectos en los, 9-102
  - regeneradores de tanque vidriado, 9-101
- Regeneradores, 9-101
  - (*véase también* Regeneración de calor)
- Registradores, 22-60, 22-69 a 22-70
  - analógicos, de gráfica circular, 22-69
  - confiabilidad, 22-61
  - digitales, 22-70
    - asociados a la computadora, 22-70
  - facilidad de lectura, 22-61
    - digital, 22-61
    - instrumentos de escala ampliada, 22-61
    - paralaje, 22-61
  - gráfica de tira, analógicos, 22-69 a 22-70
    - gráfica ancha, 22-69
    - gráfica mediana, 22-70
    - gráfica miniatura, 22-70
  - precisión de los, 22-61
  - velocidad de respuesta, 22-61
- Regresión:
  - múltiple, 2-115 a 2-120
  - simple no lineal, 2-107 a 2-115
- Reguladores de velocidad, 24-24 a 24-27
- Rehervidor de caldera, 11-10
- Rehervidores, 10-34, 13-5
  - de circulación forzada, 11-3
  - de caldera, 10-34, 11-9
  - de columna, 9-68

definición de los, 11-3
diseño de los, 10-34
de recirculación forzada, 10-35
de termosifón, 11-3
vertical, 10-35 a 10-36
Rehervidor de termosifón, 11-3
Reichenberg, correlación de, 3-325 a 3-327
Reid, resolución analítica de molienda de, 8-19
Relación de continuidad, 16-17 a 16-19
gráficas transversales contra NTU y el factor de separación, 16-31 a 16-32
separación en lechos fijos, 16-7
Relación del rendimiento de capital (CRR), 25-16
Relación de rotación de activos fijos (FATR), Fixed-asset-turnover ratio, 25-44
Relación de separación, 16-7 a 16-8, 16-15
Rellenos para el terreno, 24-53, 26-73 a 26-80
Relleno del terreno, 26-73 a 26-80
para desperdicios peligrosos, 26-79
selladores para, 26-78
Rendimiento sobre activos (ROA), 25-44
Rendimiento sobre capitales (ROE), 25-44
Rentabilidad, 25-5 a 25-40
medidas de:
modernas, 25-12 a 25-19
tradicionales, 25-10 a 25-12
Resinas:
aplicación de las, 16-36
de intercambio iónico, 16-4
Resinas fenólicas:
adsorbentes, 16-9
intercambiador de cationes, 16-10
Resistencia:
coeficiente de:
para burbujas de aire, 5-73
para esferas, discos y cilindros, 5-72
para gotas de líquido, 5-74
para partículas esféricas, 5-75
Resistencia al impacto, prueba de la, 6-110
Resistencia de materiales, prueba de, 8-69
Resistencia química:
de ácidos, 23-62
de hules, 23-62
de materiales de empaque, 23-65 a 23-67
de plásticos, 23-56
de recubrimientos orgánicos, 23-62
Resistencia a la tensión:
de aceros de baja aleación, 23-47
de aceros resistentes al calor, 23-49
de aglomerados, 8-69
de metales y aleaciones, 23-47 a 23-52
de plásticos, 23-60 a 23-62
Resistencia a la tracción:
de aceros de baja aleación, 23-47
de aceros resistentes al calor, 23-49
de metales y aleaciones, 23-47 a 23-52
Retardamiento de iones, 16-5 a 16-6
Retención de gas en columnas de burbujeo, 18-74 a 18-75
Retención del líquido disperso en el extractor, 21-77 a 21-79
Retromezclado en sistemas reaccionantes químicos, 4-30, 4-38
Reynolds, número de, 2-123
en agitación, 19-8
crítico, 5-6
definición del, 5-6
modificado, 4-52
Riccati, ecuaciones de diferencia de, 2-52
Riesgo e incertidumbre, 25-22 a 25-35
curvas en forma de S, 25-26 a 25-30
mediciones numéricas del, 25-30 a 25-34
seguro contra, 25-34
Rittinger, ley de la energía de, 8-13
Ro-Tap, agitador de malla de prueba, 21-20
Robbins y Kingrea, valores de, 3-332
Rociadores, 18-66 a 18-67
Rociamiento, 20-62
Rocío, contactores de, 18-44 a 18-45
retromezclado en, 18-45
Rocío, filetas de, 12-21 a 12-23
Rocío, secado por, definición de, 18-3
Rocío, toberas de, 20-62 a 20-63
Rocío, torres de, (*véase* Torres de rocío)
Rocíos, 18-52
definición de los, 18-77
rompimiento de la columna de líquido, 18-52 a 18-53
Rombo, área del, 2-11
Rompimiento del patrón proporcionado de sorción, 16-18
Rossin-Rammler-Bennett, distribución de partícula de, 8-5
Rotámetros, 5-20
Rubidio, propiedades termodinámicas del, 3-275
Rugosidad, factor de:
flujo en canales abiertos, 5-31
fricción de la tubería, 5-27
materiales varios, 5-27
Rugosidad de la superficie, 5-27, 5-31
Runge-Kutta, método de, 2-72

Salmueras, 12-45 a 12-51
compuestos orgánicos, 12-47 a 12-48
datos de flamabilidad, 12-51
tabla, 12-47
datos de toxicidad, 12-51
tabla, 12-47
halocarburos e hidrocarburos, 12-48
materiales de construcción para, 12-51
prevención de la corrosión, 12-50 a 12-51
salmueras inorgánicas, 12-46 a 12-47, 12-50
selección de, 12-46
Sauter, diámetro de, 20-102
Sauter, diámetro medio de, para gotitas, 18-57 a 18-58
Scheibel, torres de extracción de, 21-83 a 21-84
Schmidt, número de, 2-123
Secado:
de aglomerados:
secado por calor, 8-79
secado instantáneo, 8-81
secado por rocío, 8-79
de sólidos, 20-4 a 20-15, 21-4
aplicaciones psicométricas, 20-5 a 20-7
contenido crítico de humedad, 20-13 a 20-14
difusión de líquido, 20-11
equipo para (*véanse* Cubilotes; Secadores)

humedad de
periodo de v
periodo de v
periodos de,
pruebas, 20-
temperatura
teoría capila
terminologí
tiempo total
transferenci
transferenci
Secado por circul
Secado instantáne
Secadoras enlatad
Secador de bande
para transferen
Secadores:
agitados, 20-48
de bandejas po
con calor di
de circulaci
datos de fun
hornos, 20-
secadores d
calcinadores de
datos de co
métodos de
de cilindro, 11-
clasificación d
secadores d
secadores i
continuos:
de circulaci
hornos, 20-
de túneles,
control de los,
control pre
secadores d
secadores r
secadores d
sistema, 20
variables, 2
dieléctricos, 2
por gravedad,
hornos de túne
infrarrojos, 20
intermitentes,
de lechos con
Louisville tipo
de rocío, 20-5
aplicacione
datos de co
métodos de
uso de, 20-
rotatorios, 20-
aplicacione
con calor d
método de
Roto-Louv
rotatorio al va
selección de, 2

humedad de equilibrio, 20-13 a 20-14
periodo de velocidad constante, 20-10
periodo de velocidad descendente, 20-10 a 20-11
periodos de, 20-9
pruebas, 20-15, 20-17, 20-20
temperatura de la superficie, 20-21 a 20-22
teoría capilar, 20-11 a 20-12
terminología, 20-4 a 20-5
tiempo total de secado, 20-14
transferencia de calor, 20-20 a 20-21
transferencia de masa, 20-14 a 20-15
Secado por circulación directa, 20-28
Secado instantáneo, 8-81
Secadoras enlatadas, 11-51
Secador de bandejas agitadas, 11-49
para transferencia de calor, 11-48, 11-53
Secadores:
agitados, 20-48 a 20-53
de bandejas por lotes, 20-22
con calor directo, 20-22
de circulación completa, 20-25 a 20-28
datos de funcionamiento, 20-24 a 20-25
hornos, 20-27 a 20-29
secadores de parrillas al vacío, 20-22, 20-24
calcinadores de calor indirecto, 20-46 a 20-47
datos de costos, 20-47
métodos de diseño, 20-47
de cilindro, 11-51 a 11-52
clasificación de los, 20-16 a 20-18
secadores directos, 20-16
secadores indirectos, 20-16
continuos:
de circulación directa, 20-30 a 20-32
hornos, 20-32 a 20-33
de túneles, 20-28 a 20-29
control de los, 20-133 a 20-136
control predecible, 20-134
secadores de rocío, 20-135
secadores rotatorios, 20-133
secadores de tambor, 20-134
sistema, 20-133 a 20-134
variables, 20-133
dieléctricos, 20-16
por gravedad, 20-53 a 20-57
hornos de túnel para cerámica, 20-33
infrarrojos, 20-16
intermitentes, 20-22
de lechos con conductos, 20-56 a 20-57
Louisville tipo H, 20-37
de rocío, 20-58, 20-62 a 20-67
aplicaciones de, 20-65
datos de costos, 20-66
métodos de diseño, 20-65 a 20-66
uso de, 20-62
rotatorios, 20-33 a 20-48
aplicaciones de, 20-33
con calor directo, 20-34 a 20-38
método de alimentación, 20-33
Roto-Louvre, 20-33, 20-47 a 20-48
rotatorio al vacío, 20-48 a 20-50
selección de, 20-16
transportador neumático, 20-58 a 20-62
datos de costos, 20-62
métodos de diseño, 20-61
de transportador vibratorio, 20-57 a 20-58
de tubo al vapor, 20-44 a 20-46
de turbobandeja, 20-50 a 20-52
(*véanse también* Cubilotes; Hornos)
Secadores del cilindro, 11-51 a 11-53
Secadores vibratorios de transportador, 11-57
Sección transversal para la velocidad media, 5-11
Secciones, cónicas, 2-21
medición de consistencia, 22-47
Sedimentación, 21-69
asentadores, 21-69
centrífuga, 19-101 a 19-106
costo de la, 19-111 a 19-114
teoría de la, 19-105 a 19-106
(*véase también* Centrífugas como dispositivos de sedimentación)
componentes y accesorios para la, 19-68 a 19-70
arreglos de sobreflujo, 19-68 a 19-69
arreglos de subflujo, 19-69
estructuras de apoyo de propulsión, 19-68
instrumentación, 19-69 a 19-70
tanques, 19-57
pozo de alimentación, 19-68
definición de la, 19-59
por gravedad, 19-59 a 19-72
clasificación de pulpas, 19-59
decantación continua a contracorriente (*véase* Decantación continua a contracorriente)
diseño de la unidad, 19-72
floculación, 19-61 a 19-62
materiales de construcción, 19-72
métodos de prueba de asentamiento, 19-59 a 19-61
requerimientos de par de torsión, 19-62
requerimientos de la bomba de subflujo, 19-62
selección de la unidad, 19-72
valor nominal del par de torsión, 19-72
(*véase también* Clarificadores; Espesadores)
Sedimentación obstaculizada, 5-74
Sedimentación, velocidad de, 5-71 a 5-73
Sedimentador mezclador Pump-Mix, 21-73
Seguridad:
en el circuito de Hartford, 9-89 a 9-90
en cribado, 21-20
en intercambiadores enfriados con aire, 11-31
en procesos de líquidos térmicos, 9-89 a 9-90
en recipientes de almacenamiento, 6-114
en recipientes a presión, 6-124
en sistemas de tuberías, 6-77
Seguros y riesgos, 25-34
Sellos, 24-28
anillos O, 6-55
en bombas centrífugas, 6-10
del eje, 24-39
para ejes giratorios, 6-36 a 6-41
de gas, 6-39
jaulas de, 6-37
de laberinto, 6-38
mecánicos, 6-37

aplicaciones de los, 6-38
bujes de estrangulamiento, 6-38
externos, 6-38
internos, 6-37
materiales para los, 6-38
contra polvo, 21-11
del rotor, 24-28
Senos, ley de los, 2-28
Separación:
de burbuja de adsorción, 17-65 a 17-66
por concentración espiral, 21-30 a 21-32
por cristalización (*véase* Cristalización)
por destilación (*véase* Destilación)
eléctrica (*véase* Separaciones eléctricas)
electroforética, 21-59
electrostática (*véase* Separación electrostática)
filtración de flujo transversal, 17-56
del gas natural, 12-58
de gas en líquido, 18-88 a 18-91
de helio del gas natural, 12-58 a 12-59
Linde, sistema de, de columna sencilla, 12-57
Linde, sistemas de, de columna doble, 12-57 a 12-58
de medios densos, 21-32 a 21-37
de medios pesados, 21-32 a 21-37
de partículas en un gas, 18-77 a 18-93
de partículas líquidas en gas, 18-77 a 18-93
por procesos de membrana (*véase* Procesos de membrana)
procesos de separación por difusión (*véase* Procesos de separación por difusión)
por sedimentación y flotación, 21-32 a 21-37
por aglomeración esférica, 21-57 a 21-58
por clasificación en húmedo, 21-21 a 21-26
por clasificación sobre mesas, 21-28 a 21-30
por concentración espiral, 21-30 a 21-32
conductividad eléctrica, 21-60
por cribado, 21-14 a 21-21
dieléctrica, 21-58 a 21-59
electrostática, 21-45 a 21-51
por flotación, 21-51 a 21-55
por flotación selectiva, 21-56 a 21-57
por líquidos no miscibles, 21-58
magnética, 21-37 a 21-45
por métodos físicos, 21-26 a 21-27
óptica, 21-58 a 21-59
por procesamiento en medio denso, 21-32 a 21-37
por separación en medio pesado, 21-32 a 21-37
de sólidos:
ultrafina, 21-57 a 21-58
por ultraflotación, 21-56
de sistemas líquido-sólido, 19-45 a 19-121
selección de los separadores, 19-118 a 19-121
[*véanse también* Agitación; Agitadores; Mezclador(es)]
sólido-líquido basada en la superficie, 17-62 a 17-63
por sublimación (*véase* Sublimación)
termoadhesiva, 21-59
Separación dieléctrica, 21-58
Separación por electroforesis, 21-58
Separación electrostática, 21-3
aplicaciones de la, 21-48 a 21-51
carga por bombardeo de iones, 21-46
carga por inducción conductiva, 21-45 a 21-46
carga por electrificación de contacto, 21-45
condiciones de operación, tabla, 21-50
equipo para la, 21-47 a 21-48
Separación, factor de, 16-14 a 16-15
constante, 16-7
para transición parcial, 16-15
Separación magnética, 21-37 a 21-45
equipo para la, 21-39 a 21-45
principios de la, 21-38
Separación por medio denso, 21-32 a 21-37
costo de la, 21-36
control del proceso en la, 21-36
equipo para, 21-34 a 21-36
separador Dyna Whirlpool, 21-36
separadores de ciclón, 21-34 a 21-36
separadores de cono, 21-34
separadores de tambor, 21-34
Separación por tensión elevada (*véase* Separación electrostática)
Separación vapor líquido, 11-34, 11-40 a 11-41
pérdidas por arrastre, 11-40
por espuma, 11-40
por salpicaduras, 11-40
Souders-Brown, ecuación de, 11-40
Separaciones eléctricas, 17-38 a 17-39
dielectroforesis, 17-49 a 17-50
electrodiálisis, 17-40
electroforesis, 17-40 a 17-41
Separaciones de gas-sólido, 20-85
Separador de ciclón tipo Dutch State Mines, 21-34
Separadores:
arrastre, 18-86 a 18-87
asentadores por gravedad, 18-80
de centrífuga mecánica, 20-100
centrífugos, 18-80
de ciclón, 18-80, 20-94 a 20-100
clasificadores, 21-21 a 21-25
clasificadores en húmedo (*véase* Clasificadores)
concentradores de espiral, 21-30 a 21-32
conductividad eléctrica, 21-59
de cono, 21-34
por choque, 18-80 a 18-82
figura, 18-81
depuradores en húmedo, 18-87 a 18-89
depuradores venturi, 18-89 a 18-91
electrostáticos (*véase* Separadores electrostáticos)
por flotación, 21-51 a 21-54
Franz, 21-44
Franz Isodynamic, 21-45
hidroseparador, 21-24
Karbate, de línea de, 18-81
líquido-sólido, 19-45 a 19-121
selección de los, 19-118 a 19-121
magnéticos, 21-39 a 21-45
de malla, 21-27
de mallas [*véase* Malla(s)]
de medio denso, 21-32 a 21-37
de mesas, 21-28 a 21-30
de nieblas por tela de alambre, 18-86 a 18-87
ópticos, 21-59 a 21-60
de placa ondulada, 18-82
recolectores de lechos empacado, 18-84 a 18-85
selección de los,
de tambor, 21-3
Separadores por ar
Separadores centrí
Separadores de cic
comerciales, 20-
diseño de los, 20
dispositivos con
eficiencia de los
fraccionados
de separació
de flujo rotatori
en húmedo, 21-
Separadores por cl
Separadores electr
no conductores,
costo de los, tabl
de electrodo gir
de placa, 21-47
de placa y panta
de placas perfor
de rodillo condu
suministros de p
de tambor, 21-4
Separadores magn
aplicaciones de
de banda transv
dispositivos din
de enrejado, 21-
de Franz, 21-44
de imanes de pl
de imanes de ele
de jorobas magn
de polo inducid
imanes en C,
imanes de so
de polea magné
de rodillo induc
en seco, 21-40
de tambor magn
de alta veloc
con polarida
de poleas ma
Unigap, 21-4
de tambor moja
Separadores mecá
Separadores de pla
Serie binomial, 2-
Series convergente
pruebas para las
Series divergentes,
pruebas para las
Series infinitas, 2-
Maclaurin, serie
operaciones con
progresiones, 2-
pruebas de conv
Cauchy, prue
Maclaurin, p
prueba de co
prueba de la

selección de los, 19-118 a 19-121
de tambor, 21-34
Separadores por arrastre, 11-38, 18-85 a 18-86, 20-101, 20-103 a 20-104
Separadores centrífugos, 18-80
Separadores de ciclón, 18-80, 20-95 a 20-100
comerciales, 20-99
diseño de los, 20-98 a 20-99
dispositivos comerciales, 20-96
eficiencia de los:
fraccionados, 20-97
de separación, 20-97
de flujo rotatorio, 20-100
en húmedo, 21-21 a 21-23
Separadores por choque, 18-80 a 18-82, 20-93
Separadores electrostáticos:
no conductores, 21-48
costo de los, tabla, 21-49
de electrodo giratorio, 21-47
de placa, 21-47
de placa y pantalla, 21-47
de placas perforadas, 21-47
de rodillo conductor, 21-47 a 21-48
suministros de potencia, 21-48
de tambor, 21-47 a 21-48
Separadores magnéticos, 21-34, 21-39 a 21-45
aplicaciones de los, tabla, 21-46
de banda transversal, 21-40
dispositivos dinámicos, 21-45
de enrejado, 21-40
de Franz, 21-44
de imanes de placa, 21-40
de imanes de elevación, 21-40
de jorobas magnéticas, 21-40
de polo inducido, 21-43 a 21-45
imanes en C, 21-43
imanes de solenoide, 21-44 a 21-45
de polea magnética, 21-40 a 21-41
de rodillo inducido, 21-42 a 21-43
en seco, 21-40
de tambor magnético, 21-40 a 21-41
de alta velocidad y baja intensidad, 21-41
con polaridad alterna, 21-40
de poleas magnéticas, 21-41
Unigap, 21-40 a 21-41
de tambor mojado, 21-41 a 21-42
Separadores mecánicos centrífugos, 20-100
Separadores de platos ondulados, 18-82
Serie binomial, 2-40
Series convergentes, 2-37
pruebas para las, 2-38 a 2-39
Series divergentes, 2-37
pruebas para las, 2-38 a 2-40
Series infinitas, 2-36 a 2-41
Maclaurin, series de, 2-41
operaciones con, 2-37
progresiones, 2-40 a 2-41
pruebas de convergencia, 2-38 a 2-40
Cauchy, prueba de la raíz de, 2-38 a 2-39
Maclaurin, prueba de la integral de, 2-39
prueba de comparación, 2-38
prueba de la razón, 2-38
prueba de series alternadas, 2-39
prueba de la suma, 2-38
prueba del término *n*-ésimo, 2-38 a 2-40
Euler-Maclaurin, fórmula de, 2-41
series asintóticas, 2-41
series binomiales, 2-40
series exponenciales, 2-40
series convergentes, 2-36
series divergentes, 2-37
series logarítmicas, 2-41
series de potencia, 2-37
series trigonométricas, 2-41
series varias, 2-41
suma e identidades, 2-39 a 2-41
sumas parciales, 2-41
Taylor, series de, 2-40
Series logarítmicas, 2-41
Series de potencia, 2-37
Series U.S. de cribas, 21-14 a 21-20
tabla, 21-17
Serpentines:
externo, 11-33
de placa, 11-33
de tanque, 11-32 a 11-33
de teflón para inmersión, 11-33
tipo panel, 11-33
de tubos con aletas, 11-33
Serpentines de placa, 11-33
Serpentines de platos, 11-33
Serpentines para tanques, 10-42 a 10-43, 11-32 a 11-33
diseño térmico de los, 10-42
Serpentines de tubos con aletas, 11-33
para calentadores de tanque, 11-33
Servicio criogénico, intercambiadores de tubos en espiral para, 11-26
Servo, 24-29
SI (Sistema internacional de unidades):
conversión de las unidades U.S. usuales al, 1-4 a 1-12
prefijos, 1-2
relación gráfica, 1-3
unidades básicas, 1-2
unidades derivadas, 1-2
Sidney Young, ecuación de, 13-75
Sieder-Tate, ecuación de, 10-17
Signos matemáticos, 1-28
Silletas Intalox, 18-22, 18-25 a 18-27, 18-29 a 18-81 a 18-82
costo de las, 18-49
Silos (*véase* Almacenamiento de sólidos)
Similitud química, 4-23 a 4-24
Damköler, grupo de, 4-23 a 4-24
grupos adimensionales en la, 4-24
Simpson, regla de, 2-71
Simulación, 22-143 a 22-146
analógica, 22-143 a 22-145
digital, 22-145 a 22-146
híbrida, 22-146
Sinterización, 8-78 a 8-79
Sirofloc, procesos, 17-64 a 17-65
Sistema aire-agua, 18-41
Sistema amoniaco-aire-agua, 18-40
Sistema de coordenadas cartesianas, 2-20, 2-24

Sistema de coordenas esféricas, 2-24
Sistema de coordenadas rectangulares, 2-20, 2-24
Sistema de electrodos de corriente alterna (wiper), 21-48
Sistema de medición usual en EE UU, 1-18
Sistema de medidas usuales U.S., 1-18
 control de la contaminación:
  del aire, 26-11 a 26-20
  del agua, 26-40, 26-52
  de los desperdicios sólidos, 26-52 a 26-53
Sistema de números reales, 2-9
Sistema unificado de numeración de aleaciones, 23-41
Sistemas de almacenamiento, 12-57 a 12-60
Sistemas antiespumantes, 27-10
Sistemas en cascada para la dispersión de gas en líquido, 18-68
Sistemas de lubricación de cojinetes, 23-54
Sistemas de rociadores, 27-10 a 27-11
Sistemas ternarios, lista seleccionada de, 15-9 a 15-15
Sistemas de vacío, 6-35
Smith-Brinkley, método de, 13-37 a 13-39
Smith, algoritmo de, 2-64
Snow y Meloy, función de molibilidad de, 8-21 a 8-22
Sobrecalentadores, 9-77
 definición de los, 11-3
Sobrecarga, 24-17
Sobreflujo molar, constante, 13-30
Sobreposición de las curvas de rompimiento, 16-37
Sobretensión, 6-24
Sodio:
 calor:
  capacidad de, 3-161
  latente, 3-145
 conductividad térmica, 3-129
 energía libre, 3-189
 expansión térmica, 3-129
 propiedades físicas del, 3-22
 propiedades termodinámicas del, 3-275 a 3-276
 relación de calor específico, 3-173
 viscosidad del, 3-295 a 3-296
Sodio y aluminio, sulfato de, 20-39
Sodio, carbonato de:
 calor:
  capacidad de, 3-161
  de disolución, 3-200
  de formación, 3-189
  latente, 3-146
 datos de corrosión, 23-33 a 23-35
 energía libre, 3-189
 solubilidad en agua, 3-122
 solución acuosa:
  calor específico, 3-174
  densidad de la, 3-104
  presión parcial, 3-93
Sodio, cloruro de, 12-43 a 12-44
 calor:
  capacidad de, 3-161
  de formación, 3-189
 calor latente, 3-146
  de disolución, 3-200
 conductividad térmica, 3-297
 datos de corrosión, 23-33 a 23-35
 energía libre, 3-189
 presión de vapor del, hasta 1 atm, 3-63
 propiedades físicas del, 3-23
 solución acuosa:
  calor específico, 3-174
  densidad de la, 3-104
Sodio, hidróxido de:
 calor:
  de disolución, 3-201
  de formación, 3-189
 datos de corrosión, 23-33 a 23-35
 diagrama entalpía concentración para el, 3-277
 energía libre, 3-189
 propiedades físicas del, 3-23
 solubilidad en agua, 3-122
 solución acuosa, calor específico de la, 3-174
Sodio, nitrato de, datos de corrosión del, 23-33 a 23-35
Soldaduras:
 examen de las, 6-107 a 6-110
 factor de la junta, 6-99
 imperfecciones en las, figura, 6-107
  límites de las, tabla, 6-106
 juntas:
  soldadas a tope, 6-46
  soldadura de junta embutida, 6-46
  soldadura de sello, 6-48
 juntas soldadas a tope, 6-46
 de ramales, 6-47
  figura, 6-46
 requerimientos de fabricación de la tubería, 6-104
Sólidos:
 almacenamiento de (*véase* Almacenamiento de sólidos)
 clasificación de los, 21-14
 clasificación en húmedo (*véase* Clasificadores)
 clasificación sobre mesas de los, 21-28 a 21-30
 combustibles (*véase* Carbón;Combustibles sólidos; Coque)
 cribado de, 21-26 a 21-27
 flujo de (*véase* Flujo de gases y sólidos)
 intercambiadores de calor para (*véase* Intercambiadores de calor)
 lechos fluidificados (*véase* Lechos fluidizados)
 mezclado de (*véase* Mezclado sólido-sólido)
 muestreo de los, 21-11 a 21-14
 partículas de [*véase* Partícula(s)]
 procesamiento de (*véase* Sólidos, procesamiento de)
 propiedades de los, 8-10 a 8-13
 tipos de, 20-67
Sólidos, procesamiento de, 10-46
 transferencia de calor por conducción, 10-48, 10-50
  lechos fijos (empacados), 10-48
 transferencia de calor por contacto (directa), 10-46
  enfriamiento por evaporación, 10-51
  lecho empacado, a fluido, 10-50
  lecho empacado, a pared, 10-50
  partícula, a fluido, 10-51
 transferencia de calor por convección, 10-51 a 10-52
 transferencia de calor por radiación, 10-52
Solubilidades, 3-119 a 3-126
 de compuestos orgánicos en agua, 3-120 a 3-123
Soluciones ácidas:
 datos de corrosion:
  no oxidantes, 23-36 a 23-38

oxidantes, 2
Soluciones alcalin
datos de corrosi
no oxidantes
oxidantes, 2
Soluciones neutra
Soluciones numér
diferenciales or
diferenciales pa
integrales, 2-72
lineales, 2-62 a
no lineales, 2-6
no lineales sim
Soluciones, presic
Solvente, recuper
Solventes, propie
para extracción
selectividad, 1
Sopladores, 6-25
rotatorios, 6-25
Sopladores rotato
Sorbentes:
aplicaciones de
capacidad de lo
densidad de los
porosidad de lo
propiedades fís
densidad cr
densidad hú
Sorción, 16-5 a 1
adsorbentes, us
de ciclos múlti
cinética de rea
solución de
de componente
contacto del so
continua y casi
cromatografía,
curvas de rom
definición de l
diferencial con
de etapas m
difusión en la,
ecuación de co
ecuaciones de
forma de la
integración
equilibrio de, 1
análisis de
equipo para, 1
escalamiento e
etapa semiinte
factor de separ
por filtración d
frontal, 16-46
fuerzas impuls
HTU, 16-8
intermitente, 1
lechos:
fijo, 19-52
dividido, 1

    - oxidantes, 23-36 a 23-38
- Soluciones alcalinas:
  - datos de corrosión:
    - no oxidantes, 23-36 a 23-38
    - oxidantes, 23-33 a 23-38
- Soluciones neutras, datos de corrosión de las, 23-33 a 23-38
- Soluciones numéricas de ecuaciones:
  - diferenciales ordinarias, 2-71 a 2-72
  - diferenciales parciales, 2-73 a 2-75
  - integrales, 2-72 a 2-73
  - lineales, 2-62 a 2-65
  - no lineales, 2-64 a 2-67
  - no lineales simultáneas, 2-66
- Soluciones, presiones de vapor de las, 3-84 a 3-93
- Solvente, recuperación del, en la extracción de líquidos, 15-8
- Solventes, propiedades de los:
  - para extracción de líquidos, 15-8
  - selectividad, 15-8
- Sopladores, 6-25 a 6-28
  - rotatorios, 6-25 a 6-28
- Sopladores rotatorios, 6-25
- Sorbentes:
  - aplicaciones de los, 16-5 a 16-6
  - capacidad de los, 16-9 a 16-10
  - densidad de los, 16-9 a 16-10
  - porosidad de los, 16-10
  - propiedades físicas de los, 16-9 a 16-10
    - densidad cristalina, 16-9
    - densidad húmeda, 16-9
- Sorción, 16-5 a 16-50
  - adsorbentes, uso de los, 19-53
  - de ciclos múltiples, 16-31
  - cinética de reacción, 16-23, 16-27 a 16-29
    - solución de equilibrio no lineal, 16-31 a 16-35
  - de componentes múltiples, 16-45 a 16-48
  - contacto del sorbente granular de lechada, 16-48 a 16-49
  - continua y casi continua, 19-53
  - cromatografía, 16-39 a 16-41
  - curvas de rompimiento, 16-18 a 16-43
  - definición de la, 16-5
  - diferencial continua a contracorriente, 16-50 a 16-51
    - de etapas múltiples, 16-49 a 16-50
  - difusión en la, 16-25 a 16-27
  - ecuación de continuidad para cualquier soluto, 16-18 a 16-19
  - ecuaciones de velocidad:
    - forma de las, 16-21 a 16-23
    - integración de las, 16-24 a 16-25
  - equilibrio de, 16-10
    - análisis de equilibrio local, 16-19 a 16-20
  - equipo para, 19-50 a 19-54
  - escalamiento empírico, 16-34 a 16-35
  - etapa semiintermitente, 16-48
  - factor de separación, 16-14 a 16-16
  - por filtración de contacto, 19-50 a 19-51
  - frontal, 16-46
  - fuerzas impulsoras, 16-22
  - HTU, 16-8
  - intermitente, 16-47 a 16-48, 19-50 a 19-51
  - lechos:
    - fijo, 19-52
    - dividido, 16-38
    - mixto, 16-38, 16-43 a 16-44
  - métodos numéricos, 16-36
  - NTU, 16-21 a 16-22
  - operaciones de:
    - con alimentación cambiada, 16-36 a 16-37
    - cíclica, 16-37 a 16-38, 19-53
    - sedimentador mezclador, 19-52
    - de dos variantes, 16-44 a 16-45
  - regeneración, 16-37 a 16-38
  - regla del alfabeto, 16-45
  - regla de la pendiente, 16-45
  - relación directa, 16-7, 16-17 a 16-19
  - relación de separación, 16-7 a 16-8, 16-15
  - de sistemas multivariantes, 16-41 a 16-47
  - sistemas de tratamiento de carbón, 19-52 a 19-53
  - tamaño del fluido de transferencia de masa, 16-22 a 16-24
    - mecanismo de, 16-20 a 16-21
  - transiciones:
    - de equilibrio limitado (patrón proporcional), 16-17 a 16-20
    - de equilibrio lineal y otras de velocidad limitada, 16-30 a 16-36
  - (*véase también* Adsorción; Intercambio iónico)
  - velocidad:
    - de composición, 16-19
    - de transición, 16-19
  - velocidades de, 16-22
- Sorción de multicomponentes:
  - análisis frontal, 16-46
  - Helfferich, ecuación de, 16-46
- Souders-Brown, ecuación de, 11-40
- Stanton, número de, 2-123
- Stefan-Boltzmann, constante de, 10-56
- Stefan, flujo de, 18-92
- Stefan, mecanismo del flujo de, 20-104
- Stokes-Cunningham, corrección de, 5-76
- Stokes, diámetro de asentamiento de, 20-87
- Stokes, ley de, 5-70
  - para el tamaño de partícula, 8-8
- Stone y Webster, combustor de lecho fluidizado de, 20-82
- Sublimación, 17-14 a 17-16
  - aplicaciones de la, 17-13
  - arrastrador (portador), 17-14
  - definición de la, 17-14
  - diseño simple para la, 17-15 a 17-16
  - equipo para, 17-15
  - fraccionada, diseño para la, 17-16
  - termodinámica de la, 17-14 a 17-15
  - transferencia de masa en, 17-15
  - al vacío, 17-14
- Sulfato ferroso, datos de corrosión, 23-27 a 23-29
- Superficies cuadráticas, 2-25
- SuperSorter, 21-25 a 21-26
- Surfactantes, 18-74
- Susceptibilidad magnética, 21-38
  - de elementos y minerales, tabla, 21-39
- Sustancias puras, propiedades de las, 3-6
  - elementos y compuestos inorgánicos, 3-7 a 3-27
  - compuestos orgánicos, 3-28 a 3-56

- Tambor rotatorio para transferencia de calor, 11-49
- Tambores para transferencia de calor, 11-30

Tangentes, leyes de las, 2-28
Tanque inyector, 6-17
Tanque(s):
para almacenamiento de gases, 6-115 a 6-116
aislamiento de los, 6-115
apoyos para los, 6-115
atmosféricos, 6-111 a 6-113
abiertos, 6-113
de concreto postensado, 6-111
con cubiertas flotantes, 6-113
elevados, 6-111 a 6-113
especificaciones API para los, 6-111
normas de American Water Works Association, 6-111
calentamiento y enfriamiento de los, 11-31 a 11-33
costos de los, gráfica, 6-117 a 6-118
materiales de construcción para, 6-114
a presión, 6-113
seguridad en los, 6-114
subterráneos, 6-115
volumen de los, cálculo del, 6-113 a 6-114
Tanques a presión, 6-113
Tantalio, propiedades del, 23-49
Tapones:
medidor de orificio, 5-15 a 5-16
para medición de presión, 5-10
piezómetro, 5-10
Tapones de presión:
dimensiones, 5-10
medidores de orificio, 5-15 a 5-16
piezómetros, 5-10
Tapones de vena contracta, 5-16
Tarimas, 7-65
Tasa de rendimiento, 25-8 a 25-10
Tasa de rendimiento en el flujo discontinuo de efectivo (DCFRR), 25-6
efecto de la inflación sobre, 25-36
Taylor, series de, 2-40
Tela:
de alambre, 21-14
tamiz de seda, 21-18
Tela de alambre, 21-14
área abierta, definición del, 21-14
mallas, definición de las, 21-14
para las superficies de cribado, 21-18
Telas para filtros (*véase* Medios filtrantes)
Telas de seda, 21-18
Telemetría (*véase* Transmisión de señales)
Temperatura:
aplicación en evaporadores, 11-38
coeficiente de resistencia, 22-36
crítica, 3-135 a 3-136
predicción de la, 3-310 a 3-312
diferencia media de temperatura, 10-26
factores de corrección para intercambiadores de calor, tablas, 10-27
relación con la diferencia media logarítmica, 10-26
de ebullición, 3-312
factor en corrosión, 23-6
sensibilidad, 4-37
Temperatura de bulbo húmedo, 20-5
definición de la, 12-3
relación entre la temperatura de saturación adiabática y la, 12-3 a 12-6
Temperatura crítica de la solución, 15-6
Temperatura de ebullición, normal, 3-312
Temperatura, medición de:
pirómetros, 22-38
International Practical Temperature Scale, 22-35
termómetro bimetálico, 22-37
tipos de elementos, 22-37
termómetro de líquido en vidrio, 22-38 a 22-39
termómetros de resistencia, 22-37
termómetros de sistema lleno, 22-37
aplicación de los, 22-38
termopares, 22-35 a 22-37
metales y temperaturas intermedios, 22-35 a 22-37
Temperatura del punto de burbujeo, 13-26
Temperatura del punto de rocío, 13-26
definición de la, 12-3
Temperatura de saturación adiabática, 12-3
Temperature Scale, International Practical, 22-35
Tensión superficial, cálculo de la, 3-336 a 3-338
Teorema binomial, 2-15
Teorema del factor, 2-17
Teorema de la raíz, compleja, 2-17
Teorema de la raíz racional, 2-17
Teoremas de los residuos, 2-17
Termodinámica(s):
análisis de los procesos, 4-97 a 4-100
eficiencia, 4-98
Benedict-Webb-Rubin (BWR), 4-76, 4-82 a 4-83
calor, 4-59
de las celdas electroquímicas, 4-94 a 4-96
coeficientes de actividad, 4-69 a 4-70, 4-73 a 4-74
coeficientes de fugacidad, 4-67
datos de equilibrio de fase, 13-11 a 13-17
ecuación de estado, 4-59
ecuaciones viriales, 4-76, 4-80 a 4-82
energía interna, 4-58
entalpía, 4-59
entropía, 4-59
equilibrio [*véase* Equilibrio(s), termodinámico]
estado, definición del, 4-58
fugacidad, 4-65 a 4-66
función cero, 4-60
función residual, 4-65
Gibbs, función de, 4-61
Helmholtz, función de, 4-60
Henry, ley de, 4-68
intersecciones de la tangente, método de las, 4-71
Lewis-Randall, regla de, 4-66 a 4-67
leyes de la, 4-58 a 4-59
Margules, ecuación de, 4-83
Maxwell, ecuación de, 4-61
Pitzer, ecuación de, 4-77 a 4-81
potencial químico, 4-60
primera ley de la, 4-59
procesos, 4-58
reversible, 4-58
propiedades (*véase* Propiedades termodinámicas)
razones de equilibrio vapor líquido, 13-17 a 13-19
Redlich-Kwong, ecuación de, 4-76 a 4-82
relaciones de las
segunda ley de la
sistema, definici
soluciones, 4-67
cambios del
fugacidad de
Henry, ley de
Lewis-Rand
líquidas bina
propiedades
propiedades
soluciones i
de soluciones el
trabajo, 4-58 a 4
UNIQUAC, ec
van Laar, ecuac
Wilson, ecuació
Termómetros de l
Termopares (*véas*
Thiele-Geddes, m
Thomas, algoritm
Tierra de diatomá
Tiristores, 24-8
Titanio, aleacione
propied
Titanio, óxido de,
Tixotrópico, fluid
Toberas, 6-35, 18
convergentes-
Delaval, 5-35
de dos fluidos,
de flujo (*véase*
para mezclado
para piletas de
de presión, 20-
de rocío, 20-6
de separación,
para turbinas,
Toberas converg
Toberas de dos fl
Toberas de mezcl
Toberas neumáti
Toberas de presió
Tolueno, propied
Tolvas (*véase* Al
Toro:
área del, 2-13
volumen del, 2
Torres:
empacadas (*v*
de enfriamient
de platos perfo
de platos (*véa*
rociadas, 14-4
de rocío, 14-4
distribuido
con flujo t
verticales,
Torres empacad
aplicaciones
área efectiva,

relaciones de las propiedades (*véase* Propiedades termodinámicas,)
segunda ley de la, 4-59
sistema, definición del, 4-58
soluciones, 4-67 a 4-73
cambios del mezclado, propiedades de, 4-67
fugacidad de las, 4-65 a 4-67
Henry, ley de, 4-68
Lewis-Randall, regla de, 4-68
líquidas binarias, 4-72
propiedades de exceso de las, 4-69 a 4-72, 4-83 a 4-85
propiedades molares parciales, 4-71
soluciones ideales, 4-67 a 4-70
de soluciones electrolíticas, 4-97 a 4-98
trabajo, 4-58 a 4-59
UNIQUAC, ecuación, 4-84 a 4-85
van Laar, ecuación de, 4-83
Wilson, ecuación de, 4-83 a 4-84
Termómetros de líquido en vidrio (*véase* Temperatura, medición de)
Termopares (*véase* Temperatura, medición de)
Thiele-Geddes, método de etapa por etapa de, 13-44 a 13-46
Thomas, algoritmo de, 13-49 a 13-51
Tierra de diatomáceas, 16-9
Tiristores, 24-8
Titanio, aleaciones de, como materiales de construcción, propiedades de las, 23-38, 23-40, 23-45 a 23-46
Titanio, óxido de, 20-41
Tixotrópico, fluido, 5-4
Toberas, 6-35, 18-69 a 18-70
convergentes-divergentes, 5-35
Delaval, 5-35
de dos fluidos, 20-63
de flujo (*véase* Flujo, toberas de)
para mezclado, 21-63
para piletas de rocío, 12-21 a 12-22
de presión, 20-62 a 20-63
de rocío, 20-62 a 20-63
de separación, 17-77 a 17-78
para turbinas, 24-39
Toberas convergentes-divergentes, 5-35
Toberas de dos fluidos, 18-54 a 18-55
Toberas de mezclado, 21-63
Toberas neumáticas, 18-54 a 18-55
Toberas de presión, 18-54 a 18-55
Tolueno, propiedades termodinámicas del, 3-279
Tolvas (*véase* Almacenamiento de sólidos)
Toro:
área del, 2-13
volumen del, 2-13
Torres:
empacadas (*véase* Torres empacadas)
de enfriamiento (*véase* Torres de enfriamiento)
de platos perforados, 21-81 a 21-83
de platos (*véase* Torres de platos)
rociadas, 14-40
de rocío, 14-40 a 14-41, 21-77 a 21-78
distribuidores de las, 21-77
con flujo transversal horizontal, 14-42
verticales, 14-42 a 14-43
Torres empacadas, 18-21 a 18-44
aplicaciones en destilación, 18-44
área efectiva, 18-33 a 18-35
área de la interfase, 18-33
área mojada, 18-33 a 18-35
aspectos hidráulicos de las, 18-24
caída de presión, 14-17 a 14-18, 18-26
características de los empaques vaciados a la torre, tabla, 18-25
carga de las, 18-24 a 18-26
coeficientes generales de transferencia de masa, 14-21 a 14-22
Cornell, ecuación de, 18-35
correlación de los puntos de inundación, gráfica, 18-22
correlaciones para HTU, ejemplos de, 14-22 a 14-23
curva de operación, uso de la, 14-20
datos de HETP, uso de los, para el diseño de absorbedores, 14-23
datos para HTU, 14-21
diámetro de la columna, 14-17 a 14-18
distribución del líquido, 14-23, 18-30 a 18-31
ecuaciones de agotamiento, 14-21
efectos de la dispersión axial, 14-23
efectos terminales, 18-33
efectos de las velocidades del gas y líquido, 14-22
área de la interfase, 14-22
alturas de las unidades de transferencia, 14-22
coeficientes, 14-22
con empaques acomodados, 18-27
estimaciones de HETP, 14-23
expresión global de velocidad de transferencia de masa, 14-19 a 14-20
para extracción, 21-78 a 21-80
inundación, 18-24 a 18-26
correlación de, gráfica, 18-24
Leva, correlación de, 18-26
mala distribución, 18-30
Onda, ecuación de, 18-41
placas de apoyo, 18-26 a 18-27
punto de carga, 18-25
retención de líquido, 18-27 a 18-28
Buchanan, ecuación de, 18-28
sistema aire-agua, 18-42
sistema amoniaco-aire-agua, 18-41
sistema dióxido de azufre-aire-agua, 18-42 a 18-43
sistema dióxido de carbono-aire-agua, 18-43 a 18-44
dispersión axial, 21-80 a 21-81
inundación en, 21-80
retención, 21-79 a 21-80
tamaño crítico del empaque, 21-79
transferencia de masa en, 21-80
transferencia en fase gaseosa, 18-36 a 18-39
transferencia de la fase gaseosa, 18-34 a 18-35
unidades de transferencia, 14-20 a 14-21
Torres de enfriamiento, 12-14 a 12-21
características de las, gráficas, 12-15
a contraflujo, 12-16
de flujo cruzado, 12-16
operación de las, 12-17 a 12-19
agua de repuesto, 12-17
abatimiento de la pluma, 12-18 a 12-19
ahorro de energía, 12-19
arrastre, 12-17
neblina, 12-18 a 12-19
potencia de bombeo, 12-18
potencia del ventilador, 12-18
purga, 12-16

de tiro forzado, 12-16
de tiro inducido, 12-16
de tiro natural, 12-19 a 12-21
Torres de platos, 18-3 a 18-19
con apoyo del vertedero, 18-7
arrastre en las, 18-13 a 18-15
arreglo de los platos:
platos a contracorriente, 18-8
platos con flujo transversal, 18-8
caída de presión en las, 18-8 a 18-10, 14-17 a 14-18
capacidad de las, 18-5 a 18-8
a contraflujo, 18-3 a 18-4, 18-6
diámetro de la columna, 14-17 a 14-18
ecuaciones de agotamiento, 14-24
eficiencia global de la columna, 18-14 a 18-15
eficiencia del plato, 18-14 a 18-20
global, 14-24
tabla, 18-21
eficiencias de los platos, 14-24 a 14-25
espesor del plato perforado, 18-8
flujo tapón de líquido en las, 18-17 a 18-18
gradiente hidráulico, 18-13
inundación por arrastre, 18-5 a 18-7
con inundación de flujo descendente, 18-7 a 18-8
inversión de fase en las, 18-13
método algebraico:
gases concentrados, 14-24
gases diluidos, 14-24
tapa de burbujeo, 18-6
de platos perforados con flujo transversal, 18-6
platos de válvula, 18-6
procedimiento de diseño gráfico, 14-24 a 14-25
purgas en las, 18-6 a 18-7
para recolección de polvo, 20-106
unidades de transferencia, 18-16
(*véase también* Destilación)
velocidad de inundación del gas, 18-6
zona de espuma (rocío), 18-16 a 18-17
Torres de platos perforados, 21-81 a 21-83
ciclo controlado, 21-89
pulsadas, 21-87 a 21-88
Trabajo, definición del, 4-59
Transductores:
de balance de movimiento, 22-65
eléctricos, 22-65
neumáticos, 22-65
de balance nulo, 22-65
eléctricos, 22-65 a 22-66
electromecánicos, 22-65
conversiones analógicas y digitales, 22-66
fuerza o deformación, 22-62 a 22-65
amplificador neumático, 22-62
de balance de fuerzas, 22-62 a 22-63
de fuelles, 22-62
Hall, sensores del efecto de, 22-63 a 22-66
de relevador piloto, 22-63
mediciones eléctricas, 22-66
de movimiento giratorio, 22-61
de aguja indicadora, 22-62
de palanca, 22-62
sincromotor, 22-61
de tren de engranes, 22-61
de posición lineal, 22-62
capacitancia, 22-62
puente de inductancia, 22-62
transformador diferencial, 22-61 a 22-62
Transferencia de calor:
por atomizadores de disco centrífugo, 20-66
con cambio de fase, 10-20 a 10-21
(*véase también* Condensación; Ebullición)
coeficientes en la (*véase* Transferencia de calor, coeficientes de)
en combustión atmosférica de lecho fluidificado, 9-54
por conducción (*véase* Transferencia de calor por convección)
por contactores de rocío, 18-44 a 18-45
por convección (*véase* Convección, transferencia de calor por)
equipo para la, 11-1 a 11-59
para la fusión de sólidos, 11-50 a 11-51
para solidificación, 11-48 a 11-50
para sólidos divididos, 11-53
para sólidos laminados, 11-51 a 11-53
en evaporadores, 11-34 a 11-36
fluidos para la, 9-83
(*véase también* Transferencia de calor, sistemas de)
líquido líquido a contracorriente, 15-21
modalidades del, 10-8
por radiación (*véase* Radiación, transferencia de calor por)
en reactores con flujo heterogéneo, 4-53 a 4-54
en reactores con flujo homogéneo, 4-53
en reactores químicos, 4-32, 4-51 a 4-54
en reactores de tanque agitado, 4-53
para secadores rotatorios con calor directo, 20-37
en el secado de sólidos, 10-14, 20-23, 20-24
sistemas de (*véase* Transferencia de calor, sistemas de)
a sólidos, (*véase* Sólidos, procesamiento de)
para toberas con dos fluidos, 20-66
por toberas de presión con un solo fluido, 10-61
en torres de rocío, 21-77
Transferencia de calor, coeficiente de:
característica, tablas, 10-45 a 10-46
de condensación:
para bancos de tubos horizontales, 10-22
para condensación horizontal dentro de los tubos, 10-22
para condensación vertical dentro de los tubos, 10-21
para tubos horizontales, 10-21
para tubos verticales, 10-20 a 10-21
para vapores puros, gráfica, 10-22
para depósitos de ensuciamiento, tabla, 10-44
en evaporadores, 11-39
general, 10-12
para hornos rotatorios, 20-41
por radiación, 10-13
para secadores del cilindro, 11-52
a sólidos, 10-46 a 10-48
Transferencia de calor por convección:
coeficiente individual, 10-11
coeficiente global, 10-12
ecuaciones dimensionales, 10-12
factor J de Colburn, 10-12
relaciones adimensionales, 10-12
convección natural, 10-12 a 10-13
ecuación dimensional simplificada, 10-13
espacios encerrados, 10-13
Nusselt, ecu
con pérdida
para varias g
convección for
analogía co
flujo lamina
flujo turbule
región de tr
definición, 10-
ecuación de en
fluidos no new
metales líquid
velocidad local
Transferencia de
anillos, 10-17
bancos de tubo
ductos no circ
en recipientes
serpentines, 1(
tubos con alet
eficiencia
tubos circular
ecuaciones
efectos de
Transferencia de
cogeneración,
ahorros de
capacidad
caracterist
definición
eficiencia
útil, 9-
máquinas
principios
sistemas d
sistemas d
turbinas d
turbinas d
equipo para l
(*véase tam*
con líquido té
agua, 9-8
aceites mi
aleacione
compuest
Dowtherm
Dowtherm
mercurio,
propiedad
sales inor
seguridad
Thermino
toxicidad,
con vapor, 9-
caracterís
electricid
Transferencia d
en absorción
en adsorción
del lado d
en poros

Nusselt, ecuación de, 10-12
con pérdida simultánea de radiación, 10-13
para varias geometrías, 10-12
convección forzada, 10-13 a 10-14
analogía con la transferencia de momento, 10-14 a 10-15
flujo laminar, 10-14 a 10-15
flujo turbulento, (*véase* Transferencia de calor con flujo turbulento)
región de transición, 10-16
definición, 10-8
ecuación de energía, 10-11
fluidos no newtonianos, 10-19
metales líquidos, 10-19 a 10-20
velocidad local de la, 10-11
Transferencia de calor con flujo turbulento, 10-16 a 10-17
anillos, 10-17
bancos de tubos, 10-18 a 10-19
ductos no circulares, 10-17
en recipientes agitados, 10-19
serpentines, 10-17 a 10-18
tubos con aletas, 10-17
eficiencia de la aleta, definición de la, 10-18
tubos circulares, 10-16 a 10-17
ecuaciones dimensionales para varias condiciones, 10-17
efectos de entrada, 10-16
Transferencia de calor, sistemas de, 9-83 a 9-100
cogeneración, 9-84, 9-92 a 9-100
ahorros de combustible, gráfica, 9-92, 9-95
capacidades de funcionamiento de la, 9-98
características para las máquinas de calor, tabla, 9-94
definición de, 9-92
eficiencia global del combustible a trabajo o potencia útil, 9-97
máquinas diesel, 9-96
principios de operación, 9-98
sistemas de turbina de gas, 9-95
sistemas de turbina de vapor, 9-94, 9-97, 9-100
turbinas de gas con encendido indirecto, 9-95, 9-97 a 9-100
turbinas de gas de combustión, 9-95
equipo para los, 9-72 a 9-83
(*véase también* Generadores de vapor)
con líquido térmico, 9-85 a 9-91
agua, 9-85
aceites minerales, 9-87, 9-88 a 9-92
aleaciones de sodio y potasio, 9-88 a 9-89
compuestos de silicio, 9-88
Dowtherm A, 9-87, 9-90
Dowtherm E, 9-87, 9-90
mercurio, 9-88
propiedades físicas de, tabla, 9-86
sales inorgánicas, 9-87, 9-90 a 9-91
seguridad en, 9-90
Therminol FR, 9-88, 9-91
toxicidad, 9-89
con vapor, 9-84 a 9-85
características de, 9-84
electricidad-vapor, 9-84
Transferencia de masa:
en absorción de gas (*véase* Absorción de gas)
en adsorción, 16-20 a 16-29
del lado del fluido, 16-22 a 16-24
en poros de partículas, 16-25 a 16-26
en separación de lecho fijo, 16-6 a 16-20
suma de resistencias, 16-26 a 16-27
en superficies porosas, 16-26
Colburn, factor de, 4-52
en columnas de burbujeo, 18-74 a 18-77
en columnas empacadas, 18-34 a 18-48
en columnas de pared mojada, 18-48
en columnas de platos, 18-14 a 18-20
conversión de unidades, 14-7
en cristalización, 17-5
Chilton-Colburn, analogía de, 14-15
factor J, 14-15
definición de la, 14-8, 14-10 a 14-11
general, 14-9
en reacciones químicas líquido-líquido, 4-51
volumétrica, 14-14 a 14-15
en diálisis, 17-21 a 17-23
en difusión gaseosa, 17-73
en difusión de masa, 17-78
en difusión térmica, 17-75
Einstein, relación de, 14-13
entre fases (*véase* interfase *abajo*)
entre fases (*véase* en la interfase *abajo*)
en filtración con flujo transversal, 17-58 a 17-59
en fraccionamiento de espuma, 17-70
Henry, ley de, 14-9
HETP, 14-10
HTU, 14-10
interfase, 14-7 a 14-15
altas concentraciones de soluto, efecto de, 14-13 a 14-14
área efectiva de, 14-14
influencia de las reacciones químicas, 14-14
presión total, efectos de, 14-12
propiedad física, efecto de, 14-13
sistemas concentrados, 14-9 a 14-10
sistemas diluidos, 14-8 a 14-9
temperatura, efecto de, 14-12 a 14-13
NTU, 14-10
nomenclatura, 14-7
en ósmosis inversa, 17-25 a 17-26
en permeación de gas y líquido, 17-16 a 17-17
en reacciones químicas, 4-47 a 4-53
fluido sólido, 4-8 a 4-10, 4-48 a 4-50
gas líquido, 4-11, 4-50
líquido-líquido, 4-10 a 4-11, 4-47 a 4-51
en reactores catalíticos, 4-42 a 4-46
en recipientes agitados, 18-74 a 18-76
sólido-líquido, 19-14 a 19-15
en sublimación, 17-14
en tanques agitados, 14-42
teoría de penetración, 14-15
teoría de renovación de la superficie, 14-15
en torres de rocío, 21-78
en ultrafiltración, 17-32
unidades de transferencia, 14-10
Transformadas integrales, 2-55 a 2-57
Fourier, transformada del coseno de, 2-56 a 2-57
Fourier, transformada de, 2-56
integral de convolución, 2-56
Laplace, transformada de, 2-55 a 2-56

Transitorios hidráulicos, 5-68 a 5-69
Transmisión (*véase* Transmisión de señales)
Transmisión mecánica de potencia, unidades motrices de velocidad variable, 22-96, 22-97
  activadores de potencia eléctrica, 22-96
  bombas de salida, 22-97
Transmisión de potencia:
  convertidores de torsión hidráulica, 24-53
  transimisiones de velocidad variable:
    electrónicas, 24-53
    transmisiones hidráulicas, 24-52 a 24-53
    (*véase también* Transmisión mecánica de potencia, unidades motrices de velocidad variable)
Transmisión de potencia, equipo de, 24-50 a 24-56
  transmisiones de banda, 24-50 a 24-51
  transmisiones de cadena, 24-51
  transmisiones de engranes, 24-51
  transmisiones de velocidad variable, 24-52 a 24-53
    poleas de paso variable, 24-52
Transmisión de señales:
  analógica, 22-97 a 22-100
    corriente electrónica, 22-97
    neumática, 22-97
    transmisión de frecuencia, 22-99
    transmisión de pulso, 22-99
    voltaje electrónico, 22-91 a 22-93
  digital, 22-98 a 22-101
    computadora a computadora, 22-101
    manipulación del cambio de amplitud, 22-100 a 22-101
    manipulación del cambio de fase, 22-100 a 22-101
    manipulación del cambio de frecuencia, 22-100 a 22-101
Transmisiones de velocidad variable, 24-52 a 24-53
  electrónicas, 24-53
  poleas de paso variable, 24-52
  transmisiones hidráulicas, 24-52 a 24-53
  (*véase también* Transmisión de potencia mecánica)
Transportador de banda, 11-49
Transportador(es):
  accesorios para los, 7-58
  de banda, 7-8 a 7-12
    con rodillos locos, datos de antifricción, 7-12
    sólidos, para transferencia de calor, 11-50
  elevadores de cangilones, 7-13 a 7-15
    especificadores para cangilón continuo, 7-16
  de flujo continuo, 7-17 a 7-19
    de banda cerrada, 7-18
    de mandil, 7-18
    de paletas, 7-18
  neumáticos, 7-19 a 7-22
    costo de los, 7-20
    sistema de presión-vacío, 7-21
    sistemas de presión, 7-21 a 7-22
    sistemas de vacío, 7-21
  nomogramas, 7-23 a 7-25
  oscilantes, 7-15 a 7-17
  paquetes para:
    de banda plana, 7-58
    de cadena, 7-58
    por deslizamiento, 7-56 a 7-57
    de rodillos, 7-57 a 7-58
    de rueda por gravedad, 7-57
  de tornillo, 7-7 a 7-8
    capacidades de los, tabla, 7-7
  vibratorios, 7-13 a 7-15
    para transferencia de calor de sólidos, 11-57
Transportadores espirales para sólidos, 11-55
Transportadores de lecho de agua, 11-49
Transportadores neumáticos, 5-50 a 5-52, 20-29
  para transferencia de calor, 11-57
    caída de presión, 5-50 a 5-51
    velocidad mínima, 5-51
Transportadores vibratorios para transferencia de calor de sólidos, 11-49
Transporte de calor, sistemas de vapor para, impurezas en el agua para los, 9-84
Transporte neumático de desperdicios sólidos, 26-65
Transporte de sólidos, 7-61 a 7-68
  artículos empacados, 7-66 a 7-68
  sólidos a granel:
    camiones tolva, 7-63 a 7-64
    carros tolva, 7-62 a 7-63
Transporte de sólidos masivos, 7-3 a 7-22
  control del, 7-6
  equipo auxiliar para, 7-6
  función del tipo de transportador, tabla, 7-4
  motores para, 7-6
  pesos y tipos de materiales, tabla, 7-5
  selección del, 7-3 a 7-7
  sistema de clasificación de sólidos, tabla, 7-4
  tipo de alimentador según las características de los materiales, tabla, 7-4
  velocidades del aire requeridas para, tabla, 7-22
Trapezoide, área de, 2-11
Trapezoide, regla de, 2-70 a 2-71
Treybal, torre de, 21-87
Triángulo:
  área de, 2-11
  oblicuo, 2-29
  recto, 2-29
  soluciones de, 2-28
Tricloroetileno, 12-46 a 12-47
  propiedades termodinámicas de, 3-278
Trigonometría, 2-27 a 2-29
Trigonometría circular, 2-27 a 2-28
Trigonometría, hiperbólica, 2-29
Trituración:
  de materiales (*véase* Molienda)
  de partículas (*véase* Reducción de tamaño, de partículas)
Trituradores giratorios, 8-25 a 8-28
Trituradores de martillo, 8-30
Trituradores Pan, 8-33
Trituradores de quijada (*véase* Molienda, equipo para trituradores de quijada)
Trituradores de rodillo, 8-28 a 8-30
Tubería(s), 6-39 a 6-111
  accesorios para, 6-56
    de codo, 6-56
    de brida, 6-58
    forjados, 6-59
    fricción del fluido en los, 5-41
    reductores, 6-62
    roscados, 6-59
    soldadura a
    en "T", 6-62
  para alcantarill
    figura, 6-71
  apoyos para, 6-
  caída de presió
  circular, 5-28
  códigos y norm
    ANSI, 6-39
    OSHA, 6-4
    tubería a pr
  codos, 6-91
    caída de pr
    fuerzas en l
  condiciones de
    con aislami
    efectos din
    esfuerzo pe
    presión, 6-
    temperatur
  conexiones ra
    figura, 6-9
  sin costura, 6-
  de desagüe, 5-
  diámetro econ
  distribución d
  empaques par
  espesor de la
  estimaciones
  expansión tér
  flexibilidad d
  flexión en fríc
  flujo en las, 5-
    (*véase tam*
  juntas (*véase*
  obstrucciones
  pastas para tu
  pérdidas por f
  a presión, 6-7
  prueba de las,
  relaciones de
  requerimient
  rugosidad de
  seguridad, 6-
  para servicio
  sistemas de m
    acero al ca
    aceros de
    aceros ino
    criterios d
    expansión
    hierros, 6-
    propiedad
  sistemas de m
    acero al p
    aluminio
    circonio y
    cobre y al
    criterios
    diseño de
    expansión

alor de
zas en el agua
i5
s materiales,
tículas)
a trituradores

soldadura a tope, 6-59
en "T", 6-62
para alcantarillado por gravedad, 6-72
figura, 6-71
apoyos para, 6-101 a 6-103
caída de presión, 5-28
circular, 5-28
códigos y normas, 6-39
ANSI, 6-39
OSHA, 6-41
tubería a presión, 6-39
codos, 6-91
caída de presión, 5-43
fuerzas en los, 5-24
condiciones de diseño, 6-77 a 6-78
con aislamiento, 6-77
efectos dinámicos, 6-78
esfuerzo permitido, tabla, 6-84 a 6-91
presión, 6-77
temperatura, 6-77
conexiones ramales, 6-74
figura, 6-91
sin costura, 6-46
de desagüe, 5-49
diámetro económico de la, 5-38
distribución de velocidad, 5-26
empaques para, 6-48, 6-53
espesor de la pared, 6-46, 6-78
estimaciones de costos, 25-73 a 25-75
expansión térmica, 6-92 a 6-103
flexibilidad de las, 6-92 a 6-101
flexión en frío, 6-93
flujo en las, 5-26 a 5-60
(*véase también* Flujo de fluidos)
juntas (*véase* Juntas)
obstrucciones de operación, 6-83
pastas para tubos, 6-47
pérdidas por fricción en las, 5-27
a presión, 6-72
prueba de las, 6-106 a 6-111
relaciones de costos y clasificaciones de costos, figura, 6-112
requerimientos de fabricación de la, 6-104
rugosidad de la superficie, 5-27
seguridad, 6-77
para servicio de fluidos, clasificación de las, 6-77
sistemas de metales ferrosos:
acero al carbón, 6-42
aceros de aleación, 6-41
aceros inoxidables, 6-41
criterios de diseño, 6-78 a 6-83
expansión térmica, 6-92 a 6-103
hierros, 6-39 a 6-42, 6-65 a 6-66
propiedades de los tubos de acero, tabla, 6-43 a 6-45
sistemas de metales no ferrosos:
acero al plomo y recubierto de plomo, 6-69
aluminio y aleaciones de aluminio, 6-41, 6-67
circonio y aleaciones de circonio, 6-41, 6-71
cobre y aleaciones de cobre, 6-41, 6-67 a 6-68, 6-70
criterios de diseño, 6-78 a 6-92
diseño de los, 6-103 a 6-104
expansión térmica, 6-83 a 6-104
magnesio, 6-69
manguera flexible de metal, 6-71
níquel y aleaciones de níquel, 6-41, 6-68 a 6-71
tantalio, 6-41
titanio y aleaciones de titanio, 6-41 a 6-70
sistemas no metálicos:
acero recubierto de cemento, 6-73
asbesto cemento, 6-41, 6-71 a 6-72
de barro resistente a los productos químicos, 6-73
concreto, 6-73
de cuarzo fundido, 6-74
de grafito impermeable, 6-41, 6-72 a 6-73
de madera y recubiertas de madera, 6-74
porcelana química, 6-74
recubierta de plástico, 6-75
recubierta de vidrio, 6-74
recubiertas de hule, 6-75
resinas termoestables reforzadas, 6-41, 6-76 a 6-77
de sílice fundido, 6-74
termoplásticas, 6-42
tubería de arcilla vitrificada para albañal, 6-73
tubería de plástico, 6-75
tubo y tubería de vidrio, 6-74
vidrio de borosilicato, 6-41
soldada, 6-46
válvulas, 6-62 a 6-65, 6-83
Tubería, sistemas de, diseño de los, 6-77 a 6-104
expansión térmica, 6-83 a 6-104
esfuerzos y deformaciones, 6-91 a 6-96, 6-104
flexibilidad, 6-92
tuberías metálicas, 6-77 a 6-103
tuberías no metálicas, 6-103 a 6-104
[*véase también* Tubería(s), condiciones de diseño]
Tuberías de sobreflujo, flujo en dos fases, 5-49
Tubo, construcción del lado del, 11-10 a 11-12
Tubo(s):
con aletas integrales, 11-12
con aletas longitudinales, 11-12
con aletas (*véase* Tubos con aletas)
características de, tabla, 11-11
construcción de láminas tubulares dobles, 11-13
haz (*véase* Haces de tubos)
para intercambiadores de calor, 11-8, 11-12, 11-27
tolerancias de fabricación de los, 11-12
juntas laminadas, 11-12
juntas soldadas, 6-46, 11-13
mecánicos, 6-46
de pitot, 5-10 a 5-13
de presión, 6-47
tubos en U, 5-8
[*véase* Tubería(s)]
Tubos con aletas, 10-17, 10-44, 11-12
aletas altas, 10-44
aletas bajas, 10-44
con aletas integrales, 11-12
aplicaciones de los, 10-43
construcción de los, 11-29 a 11-30
eficiencia de la aleta, 10-18
longitudinales, 11-12
transversales, 11-12
Tubos, bancos de, 5-56 a 5-59, 18-83

caída de presión, 5-56 a 5-59
en línea, 5-58 a 5-59
región laminar, 5-59
región de transición, 5-59 a 5-60
región turbulenta, 5-57 a 5-58
remachados, 5-58
Tubos de bayoneta, 20-41
Tubos pitot, 5-10 a 5-13
limitaciones de los, 5-13
transversales para, 5-12
tubos especiales, 5-11
Tubos de rayos catódicos, 22-69
Tubos en U, 5-8 a 5-9
abiertos, 5-7
cerrados, 5-7
diferenciales, 5-7
invertidos, 5-7
de dos fluidos, 5-8
inclinados, 5-7
Turbinas:
de expansión (*véase* Turbinas de expansión)
de mezclado, 19-6 a 19-10
de vapor (*véase* Turbinas de vapor)
Turbinas de expansión, 24-36 a 24-41
aplicaciones de las, 24-40
características especiales de las, 24-37
cojinetes para las, 24-38
de empuje, 24-38
radiales, 24-38
para corrientes de condensación, 24-39 a 24-40
descripción funcional de las, 24-36 a 24-37
diseño de flujo radial, 24-37 a 24-38
eficiencia de las, 24-38
instrumentación para las, 24-41
lubricación de las, 24-40
resonancia del rotor, 24-39
selección del tamaño, 24-40
sellos, 24-39
del eje, 24-39
del rotor, 24-39
para sistemas de gas amortiguador, 24-40
con toberas variables, 24-39
trabajo calculado para las, 24-36 a 24-37
Turbinas de vapor, 24-20 a 24-33
álabes y etapas, tipos de, 24-23
Curtis, etapa de, 24-23
etapa de impulso, 24-23
etapa de reacción, 24-23
cojinetes, 24-33
control de la turbina, 24-24 a 24-30
eficiencia de las, 24-23 a 24-24
etapas múltiples:
válvula múltiple, 24-21
válvula sencilla, 24-21
funcionamiento de las, 24-23 a 24-24
problemas de operación, 24-32
arco de temperatura, 24-32
atascamiento de los vástagos de las válvulas, 24-32
erosión, 24-32
fugas de los prensaestopas, 24-32
pérdida de potencia, 24-32
selección de las, 24-30 a 24-31
sistemas de control de velocidad, 24-28 a 24-30
a distancia, 24-30
electrohidráulico, 24-29
hidráulico mecánico, 24-28
de una sola etapa y una sola válvula, 24-21
tipos de, 24-20
válvulas de disparo, 24-30
velocidades de vapor, 24-23 a 24-24
real, 24-23 a 24-24
teórica, 24-23
en turbinas con una sola etapa, 24-24
en turbinas con etapas múltiples, 24-24
Turbosopladores, 6-24 a 6-25
Twaddell, conversión de grados, 1-19
Ty-Rock, criba, figura, 21-16
Tyler, escala estándar de cribas de, 21-14, 21-19, tabla, 21-16

Ultrafiltración, 17-32
Ultraflotación, 21-56
Underwood, ecuación de reflujo mínimo de, 13-39 a 13-40
Underwwod-Fenske-Gilliland, método de, 13-39 a 13-41
Unidades de transferencia en absorción de gas, 14-10
Utilidades, 25-5 a 25-7
Utilidades retenidas, 25-46

Vacío(s):
dinámica de fluidos, 5-34 a 5-38
equipo de, 6-33
figura, 6-36
requerimientos, figura, 6-25
tiempo de detención de la bomba, 5-37 a 5-38
(*véase también* Eyectores)
Valor absoluto, 2-9
Valor neto actual (NPV) (Net present value), 25-6
efecto de la inflación sobre el, 25-36
Valor propio, problemas de, 2-8
Valor temporal del dinero, 25-10 a 25-11
Valores de la abscisa, tabla, 1-23
Valores de *ji* cuadrada, 1-24
Valores integrales varios, 2-32 a 2-33
Valores de permachor para sustancias químicas, tabla, 17-19
Valores de los segmentos circulares, 1-26
Valores umbrales límite, 12-48
Valores de X para aire y gases diatómicos perfectos, tabla, 6-18 a 6-21
Válvula de tapón, 6-63
Válvula(s), 6-62 a 6-65
de ajuste, 6-65
de ángulo, 6-63
de bola, 6-64
de compuerta, 6-62
asiento inclinado, 6-62
asiento paralelo, 6-62
de control (*véase* Válvulas de control)
de diafragma, 6-63
dimensiones de las, tabla, 6-60 a 6-61
de globo, 6-63
grifos, 6-64

de mariposa, 6-
pérdidas en las,
de retención, 6-
Válvulas de ángul
Válvulas de comp
Válvulas de contr
cuerpos de las,
determinación
selección del ti
tapones de las,
característic
disminución
índice de ga
Válvulas de diafr
Válvulas de dispa
Válvulas de globo
Válvulas de mari
(*véase también*
Válvulas de medi
Válvulas de reten
Van der Waals, fu
Van Laar, ecuació
Vapor:
compresibilida
constantes crít
datos de corro
propiedades te
Vapor de agua, s
del, 3-2
Vapor rehervido,
Vaporizadores, d
Variables aleator
Variables, compl
Variables de fun
Velocidad:
acústica, 5-5 a
de asentamien
de asentamien
caída terminal
de composició
distribución,
como factor e
media lineal,
media de mas
de películas d
sección transv
del sonido, 5-
superficial de
terminal, 5-7
de burbuja
de transición,
de transporte
Velocidad de de
Velocidad front
Velocidad míni
Ventiladores, 6-
de aletas curv
de anillo, 11-
de cámaras p
centrífugos,
curvos hacia

ıbla, 21-16
'a 13-40
ı 13-41
·10
ıbla, 17-19
, tabla,

de mariposa, 6-64
pérdidas en las, 6-27
de retención, 6-65
Válvulas de ángulo, 6-63
Válvulas de compuerta, 6-59 a 6-61
Válvulas de control, 22-86 a 22-92
cuerpos de las, 22-87
determinación de las, dimensiones, 22-91
selección del tipo de válvula, 22-90 a 22-91
tapones de las, 22-87
características de flujo de los, 22-87 a 22-90
disminución de flujo de los, 22-87
índice de gama o alcance de los, 22-87
Válvulas de diafragma, 6-60 a 6-61
Válvulas de disparo para turbinas de vapor, 24-30
Válvulas de globo, 8-60
Válvulas de mariposa, 6-63
(*véase también* Válvulas de control, cuerpos de las)
Válvulas de medición de sólidos, 22-95
Válvulas de retención, 6-64
Van der Waals, fuerzas de, 20-90
Van Laar, ecuación de, 4-83
Vapor:
compresibilidad del, 3-141
constantes críticas, 3-136
datos de corrosión, 23-36 a 23-38
propiedades termodinámicas del, 3-281 a 3-288
Vapor de agua, sólido saturado, propiedades termodinámicas del, 3-280
Vapor rehervido, definición del, 13-5
Vaporizadores, definición de los, 11-3
Variables aleatorias, 2-86
Variables, complejas, 2-35, 2-42 a 2-45
Variables de funcionamiento, 22-106, 22-132, 22-142
Velocidad:
acústica, 5-5 a 5-6
de asentamiento libre, 19-13
de asentamiento de partículas, 5-74
caída terminal, 21-75
de composición, 16-19
distribución, 5-26
como factor en la corrosión, 23-6
media lineal, 5-5
media de masa, 5-5
de películas descendentes, 5-65 a 5-67
sección transversal para la velocidad media, 5-12
del sonido, 5-5 a 5-6
superficial de masa, 5-5
terminal, 5-70 a 5-71
de burbujas, 5-72
de transición, 16-19
de transporte neumático, 5-53
Velocidad de descenso adiabático en seco (DALR), 26-24
Velocidad frontal, 11-28
Velocidad mínima de mojado, 5-67
Ventiladores, 6-22 a 6-24, 11-28, 11-29
de aletas curvas hacia atrás, 6-22
de anillo, 11-29
de cámaras plenas, 11-29
centrífugos, 6-22 a 6-23
curvos hacia atrás, 6-22
de disco, 6-22
eficiencia de los, 6-23
de flujo axial, 6-22
funcionamiento de los, 6-22 a 6-23
de paletas rectas, 6-22
de propulsor, 6-22
selección de los, 6-24
tipo sirocco, 6-22
unidades motrices, 11-30
Ventiladores centrífugos, 6-22
Ventiladores rotatorios, sello de los, 6-36 a 6-39
Venturi, depuradores, 14-43, 18-44, 18-82, 18-84 a 18-86, 20-108
para polvo, 20-106
Venturi, medidores de, 5-13 a 5-14
coeficiente de descarga de los, 5-14, 5-17 a 5-18
Herschel, tipo, 5-13 a 5-14
precisión de los, 5-17 a 5-20
sistema venturi múltiple, 5-14
Vertederos, 5-21
Francis, fórmula de, 5-21
de muescas triangulares, 5-21
rectangulares, 5-21
Vía del vórtice (*véase* Derramamiento del vórtice)
Vidrio:
acero vidriado, 23-49
propiedades del, 23-56
Virus, 27-4
Viscosidad, 3-291 a 3-298, 3-325
cinemática, 5-5
definición de la, 5-4
de gases, 3-291, 3-325 a 3-327
nomograma, 3-292 a 3-294
de líquidos, 3-327 a 3-329
nomograma, 3-295 a 3-296
medición de la, 22-51
de soluciones de sucrosa, 3-298
unidades de, 5-5
Viscosidad cinemática, 5-5
fórmulas de conversión, 1-18
Volatilidades relativas, 13-18, 13-28, 13-39, 13-58 a 13-59
Volterra, ecuación de, 2-53
Volterra, ecuación integral de, 2-53
Volumen:
crítico, predicción del, 3-311 a 3-312
fórmulas para, 2-13
cilindro, 2-13
cono, 2-13
cubo, 2-13
elipsoide, 2-13
esfera, 2-12
esferoide achatado en los polos, 2-13
esferoide ahusado, 2-13
formas irregulares, 2-14
paralelepípedo rectangular, 2-13
pirámide, 2-13
poliedro regular, 2-13
prisma, 2-13
toro, 2-13
truncamiento de la pirámide, 2-13
varias, 2-14
de mezclas líquidas, 3-318 a 3-320

Volumen crítico, predicción del, 3-311 a 3-312
Volumen húmedo, definición del, 12-3
Volumen pulsado, definición del, 21-88
Volumen saturado, definición del, 12-3
Volúmenes específicos (*véase* fluido específico)

Waldhof, impulsores de, 18-68 a 18-69
Ward-Leonard, transmisión para motor, 24-8
Weber, número de, 2-121
Weddle, regla de, 2-71
Wegstein, método de, 2-66 a 2-67
Wiedemann-Franz, ley de, 10-57
Wien, ley de desplazamiento de, 10-57
Wilson, ecuación de, 4-84
Winkler, gasificador de, 9-24

Xenón, propiedades termodinámicas del, 3-290

Yeso, 20-42
Yodo, calor latente del, 3-144

Zeolitas para adsorción, 16-6
Zeta, potencial, 17-39

Universidad de Carabobo
BIBLIOTECA
Facultad de Ingeniería

TABLA 1-5 Factores métricos de conversión como múltiplos numéricos exactos de las unidades SI.
Los dos primeros dígitos de cada valor numérico representan una potencia de 10. Por ejemplo, el valor "—02 2.54" expresa el hecho de que 1 pulg = 2.54×10^{-2} metro.

Para convertir de	*a*	*multiplíquese por*
abampere	ampere	+01 1.00
abcoulomb	coulomb	+01 1.00
abfarad	farad	+09 1.00
abhenry	henry	−09 1.00
abmho	mho	+09 1.00
abohm	ohm	−09 1.00
abvolt	volt	−08 1.00
acre	metro^2	+03 4.046 856
ampere (internacional de 1948)	ampere	−01 9.998 35
angstrom	metro	−10 1.00
área	metro^2	+02 1.00
atmósfera	newton/metro^2	+05 1.013 25
año (calendario)	segundo (solar medio)	+07 3.1536
año (sideral)	segundo (solar medio)	+07 3.155 815
año (tropical)	segundo (solar medio)	+07 3.155 692
año 1900, tropical, enero, día 0, hora 12	segundo (efemérides)	+07 3.155 692
año 1900, tropical, enero, día 0, hora 12	segundo	+07 3.155 692
año luz	metro	+15 9.460 55
bar	newton/metro^2	+05 1.00
barn	metro^2	−28 1.00
barril (petróleo, 42 galones)	metro^3	−01 1.589 873
barya	newton/metro^2	−01 1.00
braza	metro	+00 1.828 8
British thermal unit (unidad térmica británica)(ISO/TC 12)	joule	+03 1.055 06
British thermal unit (media)	joule	+03 1.055 87
British thermal unit (Tabla Internacional de Vapor)	joule	+03 1.055 04
British thermal unit (termoquímica)	joule	+03 1.054 350
British thermal unit (39° F)	joule	+03 1.059 67
British thermal unit (60° F)	joule	+03 1.054 68
bushel (E.U.)	metro^3	−02 3.523 907
caballo de potencia (550 pie-lbf/segundo)	watt	+02 7.456 998
caballo de potencia (agua)	watt	+02 7.460 43
caballo de potencia (caldera)	watt	+03 9.809 50
caballo de potencia (eléctrico)	watt	+02 7.46
caballo de potencia (métrico)	watt	+02 7.354 99
caballo de potencia (R.U.)	watt	+02 7.457
cable	metro	+02 2.194 56
cadena (del agrimensor o gunter)	metro	+01 2.011 68
cadena (del ingeniero o ramden)	metro	+01 3.048
calibre	metro	−04 2.54
caloría (media)	joule	+00 4.190 02
caloría (Tabla Internacional de Vapor)	joule	+00 4.1868
caloría (termoquímica)	joule	+00 4.184
caloría (15° C)	joule	+00 4.185 80
caloría (20° C)	joule	+00 4.181 90
caloría (kilogramo, media)	joule	+03 4.190 02
caloría (kilogramo, Tabla Internacional de Vapor)	joule	+03 4.186 8
caloría (kilogramo, termoquímica)	joule	+03 4.184
Celsius (temperatura)	kelvin	$t_K = t_C + 273.15$
centímetro de agua (4° C)	newton/metro^2	+01 9.806 38
centímetro de mercurio (0° C)	newton/metro^2	+03 1.333 22
circular mil	metro^2	−10 5.067 074
codo	metro	−01 4.572
coulomb (internacional de 1948)	coulomb	−01 9.998 35
cuarto (E.U., áridos)	metro^3	−03 1.101 220
cuarto (E.U., líquidos)	metro^3	−04 9.463 529
cuchara	metro^3	−05 1.478 676
cucharita	metro^3	−06 4.928 921
cuerda	metro^3	+00 3.624 556
curie	desintegración/seg	+10 3.70
denier (internacional)	kilogramo/metro	−07 1.00
día (sideral)	segundo (solar medio)	+04 8.616 409
día (solar medio)	segundo (solar medio)	+04 8.64
dina	newton	−05 1.00
dracma (avoirdupois)	kilogramo	−03 1.771 845
dracma (E.U., fluidos)	metro^3	−06 3.696 691
dracma (troy o del boticario)	kilogramo	−03 3.887 934
electrón-volt	joule	−19 1.602 10
erg	joule	−07 1.00
escrúpulo (pennyweight)	kilogramo	−03 1.555 173
escrúpulo (del boticario)	kilogramo	−03 1.295 978
eslabón (del agrimensor o gunter)	metro	−01 2.011 68
eslabón (del ingeniero o ramden)	metro	−01 3.048
estéreo	metro^3	+00 1.00
Farenheit (temperatura)	Celsius	$t_C = (5/9)(t_F - 32)$
Farenheit (temperatura)	kelvin	$t_K = (5/9)(t_F + 459.67)$
farad (internacional de 1948)	farad	−01 9.995 05
faraday (basado en el carbono 12)	coulomb	+04 9.648 70
faraday (físico)	coulomb	+04 9.652 19
faraday (químico)	coulomb	+04 9.649 57
fermi (femtometro)	metro	−15 1.00
furlong	metro	+02 2.011 68
gal (galileo)	metro/segundo^2	−02 1.00
galón (E.U., áridos)	metro^3	−03 4.404 883
galón (E.U., líquidos)	metro^3	−03 3.785 411
galón (R.U., líquidos)	metro^3	−03 4.546 087
gamma	tesla	−09 1.00
gauss	tesla	−04 1.00
gilbert	ampere-vuelta	−01 7.957 747
gill (E.U.)	metro^3	−04 1.182 941
gill (R.U.)	metro^3	−04 1.420 652
grad	grado (angular)	−01 9.00
grad	radián	−02 1.570 796
grado (ángulo)	radián	−02 1.745 329
gramo	kilogramo	−03 1.00
grano	kilogramo	−05 6.479 891
hectárea	metro^2	+04 1.00
henry (internacional de 1948)	henry	+00 1.000 495
hora (sideral)	segundo (solar medio)	+03 3.590 170
hora (solar media)	segundo (solar medio)	+03 3.60
joule (internacional de 1948)	joule	+00 1.000 165
kayser	1/metro	+02 1.00
kilocaloría (media)	joule	+03 4.190 02
kilocaloría (Tabla Internacional de Vapor)	joule	+03 4.186 74
kilocaloría (termoquímica)	joule	+03 4.184
kilogramo fuerza (kfg)	newton	+00 9.806 65
kilogramo masa	kilogramo	+00 1.00
kilopond fuerza	newton	+00 9.806 65
kip	newton	+03 4.448 221
lambert	candela/metro^2	+04 $1/\pi$
lambert	candela/metro^2	+03 3.183 098

TABLA 1-6 Factore
Los dos primeros dígi
pulg = 2.54×10^{-2}

Para convertir d
langley
lbf (libra fuerza, avoirdupois)
lbm (libra masa, avoirdupois)
legua (británica náutic
legua (internacional ná
legua (terrestre)
libra fuerza (lbf avoirdupois)
libra masa (lbm avoirdupoi
libra masa (troy o del botica
litro
lux
mano
maxwell
mes (calendario me
metro
micra
mil
milibar
milímetro de mercu
milla (E.U., náutic
milla (E.U., terrest
milla (náutica intern
milla (R.U., náutic
milla náutica (E.U.
milla náutica (intern
milla náutica (R.U.
milla terrestre (E.U
minuto (ángulo)
minuto (sideral)
minuto (solar medi
nudo (internaciona
oersted
ohm (internacional
onza (E.U., fluidos
onza fluida (E.U.)
onza fuerza (avoir
onza masa (avoirdu
onza masa (tro boticario)
palmo
parsec
pascal
paso
peck (E.U.)
percha
pértiga
phot
pica (impresores)
pie
pie (E.U., agrimen
pie (E.U., agrimen
pie de agua (39.2°F

TABLA 1-5 Factores métricos de conversión como múltiplos numéricos exactos de las unidades SI (*Continuación*).

Los dos primeros dígitos de cada valor numérico representan una potencia de 10. Por ejemplo, el valor "—02 2.54" expresa el hecho de que 1 pulg = 2.54×10^{-2} metro.

Para convertir de	*a*	*multiplíquese por*
langley	joule/metro^2	+04 4.184
lbf (libra fuerza, avoirdupois)	newton	+00 4.448 221
lbm (libra masa, avoirdupois)	kilogramo	−01 4.535 923
legua (británica náutica)	metro	+03 5.559 552
legua (internacional náutica)	metro	+03 5.556
legua (terrestre)	metro	+03 4.828 032
libra fuerza (lbf avoirdupois)	newton	+00 4.448 221
libra masa (lbm avoirdupois)	kilogramo	−01 4.535 923
libra masa (troy o del boticario)	kilogramo	−01 3.732 417
litro	metro^3	−03 1.00
lux	lumen/metro^2	+00 1.00
mano	metro	−01 1.016
maxwell	weber	−08 1.00
mes (calendario medio)	segundo (solar medio)	+06 2.628
metro	longitudes de onda de Kr 86	+06 1.650 763
micra	metro	−06 1.00
mil	metro	−05 2.54
milibar	newton/metro^2	+02 1.00
milímetro de mercurio (0°C)	newton/metro^2	+02 1.333 224
milla (E.U., náutica)	metro	+03 1.852
milla (E.U., terrestre)	metro	+03 1.609 344
milla (náutica internacional)	metro	+03 1.852
milla (R.U., náutica)	metro	+03 1.853 184
milla náutica (E.U.)	metro	+03 1.852
milla náutica (internacional)	metro	+03 1.852
milla náutica (R.U.)	metro	+03 1.853 184
milla terrestre (E.U.)	metro	+03 1.609 344
minuto (ángulo)	radián	−04 2.908 882
minuto (sideral)	segundo (solar medio)	+01 5.983 617
minuto (solar medio)	segundo (solar medio)	+01 6.00
nudo (internacional)	metro/segundo	−01 5.144 444
oersted	ampere/metro	+01 7.957 747
ohm (internacional de 1948)	ohm	+00 1.000 495
onza (E.U., fluidos)	metro^3	−05 2.957 352
onza fluida (E.U.)	metro^3	−05 2.957 352
onza fuerza (avoirdupois)	newton	−01 2.780 138
onza masa (avoirdupois)	kilogramo	−02 2.834 952
onza masa (troy o del boticario)	kilogramo	−02 3.110 347
palmo	metro	−01 2.286
parsec	metro	+16 3.083 74
pascal	newton/metro^2	+00 1.00
paso	metro	−01 7.62
peck (E.U.)	metro^3	−03 8.809 767
percha	metro	+00 5.0292
pértiga	metro	+00 5.0292
phot	lumen/metro^2	+04 1.00
pica (impresores)	metro	−03 4.217 517
pie	metro	−01 3.048
pie (E.U., agrimensura)	metro	+00 1200/2937
pie (E.U., agrimensura)	metro	−01 3.048 006
pie de agua (39.2°F)	newton/metro^2	+03 2.988 98
pie-bujía	lumen/metro^2	+01 1.076 391
pie-lambert	candela/metro^2	+00 3.426 259
pinta (E.U., áridos)	metro^3	−04 5.506 104
pinta (E.U., líquidos)	metro^3	−04 4.731 764
poise	newton-segundo/metro^2	−01 1.00
polo unitario	weber	−07 1.256 637
poundal	newton	−01 1.382 549
pulgada	metro	−02 2.54
pulgada de agua (39.2°F)	newton/metro^2	+02 2.490 82
pulgada de agua (60°F)	newton/metro^2	+02 2.4884
pulgada de mercurio (32°F)	newton/metro^2	+03 3.386 389
pulgada de mercurio (60°F)	newton/metro^2	+03 3.376 85
punto (impresores)	metro	−04 3.514 598
quilate (métrico)	kilogramo	−04 2.00
quintal (corto)	kilogramo	+01 4.535 923
quintal (largo)	kilogramo	+01 5.080 234
rad (dosis de radiación absorbida)	joule/kilogramo	−02 1.00
Rankine (temperatura)	kelvin	$t_K = (5/9)t_R$
rayleigh (rapidez de emisión de fotones)	1/segundo-metro^2	+10 1.00
rhe	metro^2/newton-segundo	+01 1.00
roentgen	coulomb/kilogramo	−04 2.579 76
rutherford	desintegración/segundo	+06 1.00
sacudida	segundo	−08 1.00
sección	metro^2	+06 2.589 988
segundo (ángulo)	radián	−06 4.848 136
segundo (efemérides)	segundo	+00 1.000 000
segundo (sideral)	segundo (solar medio)	−01 9.972 695
segundo (solar medio)	segundo (efemérides)	Consúltese *American Ephemeris* y el *Nautical Almanac*
skein	metro	+02 1.097 28
slug	kilogramo	+01 1.459 390
statampere	ampere	−10 3.335 640
statcoulomb	coulomb	−10 3.335 640
statfarad	farad	−12 1.112 650
stathenry	henry	+11 8.987 554
statmho	mho	−12 1.112 650
statohm	ohm	+11 8.987 554
statvolt	volt	+02 2.997 925
stilb	candela/metro^2	+04 1.00
stoke	metro^2/segundo	−04 1.00
taza	metro^3	−04 2.365 882
tonel (E.U.)	metro^3	−01 2.384 809
tonelada (corta, 2000 libras)	kilogramo	+02 9.071 847
tonelada (de ensayo)	kilogramo	−02 2.916 666
tonelada (equivalente nuclear de TNT)	joule	+09 4.20
tonelada (larga)	kilogramo	+03 1.016 046
tonelada (métrica)	kilogramo	+03 1.00
tonelada (registrada)	metro^3	+00 2.831 684
tonne	kilogramo	+03 1.00
torr (0°C)	newton/metro^2	+02 1.333 22
township	metro^2	+07 9.323 957
unidad astronómica	metro	+11 1.495 978
vara	metro	+00 5.0292
volt (internacional de 1948)	volt	+00 1.000 330
watt (internacional de 1948)	watt	+00 1.000 165
yarda	metro	−01 9.144